

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Основана в 1959 г.

Выпуск 570

Ш. М. МАРГОЛИН

ТОЧНАЯ ОСТАНОВКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

*Второе издание, переработанное
и дополненное*



МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1984

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. Н. Андреевский, С. А. Бажанов, Ю. В. Зайцев, Д. Т. Комаров, В. П. Ларионов, Э. С. Мусаэлян, С. П. Розанов, Ф. И. Синьчугов, В. А. Семенов, А. Д. Смирнов, А. Н. Трифонов, П. И. Устинов, А. А. Филатов

Марголин Ш. М.

M25 Точная остановка электроприводов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 104 с., ил. — (Б-ка электромонтера; Вып. 570).

30 к. 17 000 экз.

Рассматриваются способы автоматической точной остановки электроприводов переменного и постоянного тока. Описаны методы расчета неточности остановки, выбор мест установки датчиков положения. Дана сравнительная характеристика датчиков разных типов.

Рассмотрены различные способы получения пониженной частоты вращения электродвигателей, используемые в схемах точной остановки. Описаны новые эффективные методы торможения. Первое издание вышло в 1965 г.

Для электромонтеров и мастеров промышленных предприятий.

М 2302050000-323
051(01)-84 162-84

ББК 31.291

6П2.1

ШАРЛЬ МОИСЕЕВИЧ МАРГОЛИН

ТОЧНАЯ ОСТАНОВКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Редактор издательства Л. В. Копейкина

Художественный редактор В. А. Гозак-Хозак

Технический редактор В. В. Хапаева

Корректор Л. С. Тимохова

ИБ № 3222

Сдано в набор 15.12.83

Подписано в печать 21.02.84

Т 06245

Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 3

Гарнитура литературная

Печать высокая Усл. печ. л. 5,46 Усл. кр.-отт. 5,72 Уч.-изд. л. 6,1

Тираж 17 000 экз. Заказ 3339 Цена 30 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113054, Москва, М-54, Валуевская, 28

© Энергоатомиздат, 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ

Автоматически работающий механизм должен совершать заданное программой перемещение с требуемой степенью точности. Перемещение механизма в заданное положение часто называют позиционированием. Задачу автоматического позиционирования обычно решают средствами электропривода.

С ростом производительности современных механизмов и соответственно с увеличением их рабочих скоростей возрастают трудности осуществления автоматической точной остановки электропривода. Неточная остановка электропривода может явиться серьезным препятствием к созданию автоматической линии, к автоматизации работы отдельного механизма. При ручном (дистанционном или местном) управлении для остановки механизма в заданном положении часто приходится многократно включать механизм, что ведет к потере времени, повышенному расходу электроэнергии и нагреву двигателя, преждевременному износу оборудования.

Переход к автоматической точной остановке обеспечивает повышение производительности механизмов благодаря торможению за минимально возможное время, увеличение срока службы механизмов, электродвигателей и аппаратуры, уменьшение нагрева, сокращение числа операторов. Точная остановка механизмов станка дает возможность повысить точность обработки изделий. На многих металлургических агрегатах с повышением точности автоматической остановки удастся уменьшить потери металла и получить прокат заданных размеров. Имеется большое число производственных механизмов, которые вообще не могут работать автоматически без точной остановки в заданных положениях. К таким механизмам относятся различного типа и назначения подъемники и лифты, некоторые узлы станков (например, шпиндель с борштангой на расточных станках), всевозможные кран-балки и передаточные тележки, несущие на себе рельсовые пути, которые должны при остановке точно совпадать со стационарными

рельсами, и др. Точная остановка широко применяется на вспомогательных механизмах прокатных станов, на автоматических технологических линиях, на различных переключателях и других грузоподъемных механизмах и т. д.

Неточность остановки механизма измеряется его максимальным отклонением от заданного положения. Она зависит от большого числа факторов: от погрешностей датчиков положения механизмов и релейно-контакторной аппаратуры, от изменений момента тормоза и момента нагрузки, от колебаний напряжения и частоты питающей сети и т. д.

Правильный выбор типа датчиков, мест их установки, формы и длины переключающих упоров или пластин, способов торможения и регулирования частоты вращения двигателей для повышения точности остановки — таковы главные задачи, которые часто приходится решать работникам электрохозяйства заводов при наладке и эксплуатации схем автоматического управления механизмами.

В настоящей книге подробно рассмотрены способы практического осуществления остановки электроприводов с заданной точностью. По сравнению с первым изданием книга существенно переработана и дополнена. Заново написаны параграфы о бесконтактных датчиках, конечных выключателях и командоаппаратах; в значительной степени обновлен материал, относящийся к способам получения пониженной частоты вращения асинхронных двигателей и к эффективным методам их электрического торможения. Расчетные формулы приведены в международной системе единиц СИ.

Все замечания и пожелания по данной книге будут с благодарностью приняты. Просьба направлять их по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Автор

1. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА¹

В процессе торможения механизм (и соответственно вал электродвигателя) проходит некоторый путь, значение которого не является постоянным, что и приводит к неточности остановки электропривода.

Рассмотрим, из чего складывается путь механизма от заданного момента срабатывания датчика положения до полной остановки. Так как механизм может совершать различные виды движения (поступательное, вращательное и др.), удобнее рассматривать угловой путь вала двигателя (в оборотах или градусах), а затем пересчетом находить путь механизма. Угол поворота вала двигателя φ_t на участке торможения состоит из трех слагаемых:

$$\varphi_t = \varphi'_t + \varphi''_t + \varphi'''_t. \quad (1)$$

Первое слагаемое φ'_t — это угол поворота вала двигателя от заданного момента срабатывания датчика положения до его действительного переключения. Этот угол определяется погрешностью датчика. Характеристика точности датчиков положения различных типов дана в § 5 и 6.

Второе слагаемое φ''_t равно углу поворота вала за время срабатывания электроаппаратуры, включающей торможение электродвигателя. Величина φ''_t , как и φ'_t , не является постоянной и зависит от изменения частоты вращения вала двигателя и погрешностей времени срабатывания электроаппаратуры. Частота вращения двигателя может меняться при изменении статического момента нагрузки, напряжения или частоты питающей сети, изменении параметров машины из-за колебаний температуры окружающей среды. Время срабатывания аппаратуры в свою очередь не является постоянной величиной и зависит от напряжения, температуры, влажности и т. п.

Средняя погрешность времени срабатывания контакторов составляет 10%. Время включения крупных контакторов постоянного тока достигает 0,25—0,3 с, контакторов

¹ Необходимые понятия и формулы — см. приложение 1 я в [1].

1-й величины — 0,1 с, реле РЭВ800 — 0,04—0,07 с. Контакторы переменного тока являются более быстродействующими аппаратами, чем контакторы постоянного тока: время их включения равно 0,05—0,07 с. Время размыкания контакта обычно составляет 20—95% времени замыкания. При построении схем автоматики на бесконтактных логических элементах учитывают лишь время срабатывания выходных контакторов.

Третье слагаемое $\varphi'''_т$ равно угловому пути вала двигателя за время снижения частоты вращения в процессе торможения. Путь торможения прямо пропорционален запасенной движущимися частями кинетической энергии и обратно пропорционален тормозному моменту на валу двигателя. Как и две предыдущие, составляющая $\varphi'''_т$ не является постоянной и зависит от ряда переменных величин — от квадрата частоты вращения двигателя, момента инерции движущихся частей, тормозного и статического моментов на валу, трения.

Рассмотрим более подробно расчет пути вала двигателя в процессе остановки и определение неточности остановки.

Обозначив погрешность датчика угла поворота вала (например, вращающегося командоаппарата) в градусах через $\pm\delta$ и учитывая, что при этом максимальный путь механизма, обусловленный погрешностью датчика, соответственно пропорционален его удвоенной погрешности, получим¹

$$\varphi'_{т, \max} = \frac{2\delta i}{360} = \frac{\delta i}{180}, \quad (2)$$

где i — передаточное число кинематической цепи от вала двигателя к барабану командоаппарата.

Если используется датчик положения, установленный вдоль пути механизма, то его линейную погрешность нетрудно перевести в угловую, приведенную к валу двигателя. Второе слагаемое пути

$$\varphi''_т = \frac{n_1 t_a}{60}, \quad (3)$$

где n_1 — частота вращения в момент начала торможения, об/мин; t_a — время срабатывания аппаратуры, с. Третье слагаемое пути

$$\varphi'''_т = \frac{J n_1^2}{1146(M_t + M_c)}, \quad (4)$$

где J — суммарный приведенный момент инерции движущихся частей привода, кг·м² (расчет см. ниже); M_t , M_c — приведенные к валу двигателя тормозной и статический моменты; Н·м.

Формула для $\varphi'''_т$ справедлива, если моменты M_t и M_c неизменны в процессе торможения (см. приложение 1).

Обозначив сумму моментов $M_t + M_c$ как $M_{дин}$ — динамический момент, получим

$$\varphi'''_т = \frac{J n_1^2}{1146 M_{дин}}.$$

Таким образом, угол $\varphi_т$ равен

$$\varphi_т = \frac{\delta i}{180} + \frac{n_1 t_a}{60} + \frac{J n_1^2}{1146 M_{дин}}. \quad (5)$$

Обозначим максимальный и минимальный углы торможения через $\varphi_{т, \max}$ и $\varphi_{т, \min}$ (рис. 1).

Среднее значение угла торможения

$$\varphi_{т, \text{ср}} = \frac{\varphi_{т, \max} + \varphi_{т, \min}}{2}. \quad (6)$$

Максимальное отклонение от заданного положения; определяющее значение неточности остановки, равно

$$\Delta\varphi_{т, \max} = \pm \frac{\varphi_{т, \max} - \varphi_{т, \min}}{2}. \quad (7)$$

Максимальные и минимальные значения переменных величин n_1 , J , M_t , M_c можно представить в виде алгебраической суммы среднего значения и максимального отклонения: $n_1 = n_{1, \text{ср}} \pm \Delta n_1$, $t_a = t_{a, \text{ср}} \pm \Delta t_a$ и т. д.

Подставив эти значения в (5), найдем $\varphi_{т, \max}$ и $\varphi_{т, \min}$, а затем и искомую величину неточности остановки $\Delta\varphi_{т, \max}$. Учтем также, что угол $\varphi'_т$ меняется от $\varphi'_{т, \min} = 0$ до $\varphi'_{т, \max} = \frac{\delta i}{180}$, т. е. максимальное отклонение равно

$$\Delta\varphi'_т = \frac{\varphi'_{т, \max}}{2} = \frac{\delta i}{360}.$$

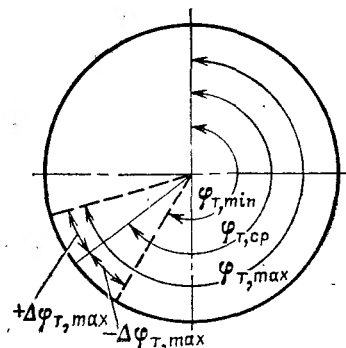


Рис. 1. Диаграмма углов торможения вала электропривода

¹ Здесь и ниже составляющие углового пути $\varphi_т$ выражаем в оборотах вала двигателя.

В результате получим следующую приближенную формулу для вычисления максимальной неточности остановки:

$$\Delta\varphi_{т, max} = \frac{\delta i}{360} + \frac{n_{1cp} t_{a, cp}}{60} \left(\frac{\Delta n_1}{n_{1cp}} + \frac{\Delta t_a}{t_{a, cp}} \right) + \frac{J_{cp} n_{1cp}^2}{1146 M_{дин, cp}} \left(2 \frac{\Delta n_1}{n_{1cp}} + \frac{\Delta J}{J_{cp}} + \frac{\Delta M_{дин}}{M_{дин, cp}} \right), \quad (8)$$

или, обозначив величины перед скобками как $\varphi'_{т, cp}$ и $\varphi''_{т, cp}$,

$$\Delta\varphi_{т, max} = \frac{\varphi'_{т, max}}{2} + \varphi''_{т, cp} \left(\frac{\Delta n_1}{n_{1cp}} + \frac{\Delta t_a}{t_{a, cp}} \right) + \varphi'''_{т, cp} \left(2 \frac{\Delta n_1}{n_{1cp}} + \frac{\Delta J}{J_{cp}} + \frac{\Delta M_{дин}}{M_{дин, cp}} \right). \quad (9)$$

Как видно из формул, для повышения точности остановки важно, чтобы торможение начиналось с возможно более низкой начальной частоты вращения n_1 . С уменьшением частоты вращения падает $\varphi''_{т, cp}$ и особенно сильно $\varphi'''_{т, cp}$.

Нужно стремиться к сокращению пути торможения, уменьшению времени срабатывания аппаратуры. Точность остановки повышается с ростом тормозного момента $M_{дин}$, с уменьшением момента инерции J , уменьшением погрешности датчика положения δ . Необходимо также стремиться к уменьшению отклонения переменных от их среднего значения. Так, например, если механическая характеристика двигателя является жесткой (см. приложение 1), то при колебаниях момента нагрузки на валу отклонения частоты вращения $\Delta n'$ малы. На рис. 2 показано, как сильно при одном и том же отклонении статического момента ΔM_c изменяется отклонение частоты вращения $\Delta n'$ на мягкой характеристике 1 и как мало $\Delta n''$ на жесткой характеристике 2. В схемах точной остановки мягкие характеристики, как правило, не используются.

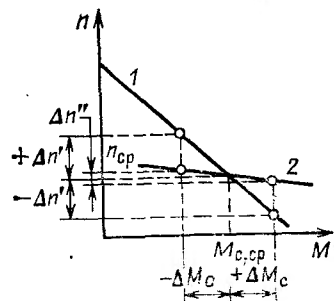


Рис. 2. Жесткая и мягкая механические характеристики

Наиболее эффективным средством повышения точности остановки является уменьшение начальной частоты вращения n_1 . На практике это достигается предварительным переводом двигателя на пониженную («ползучую») частоту

вращения (рис. 3). После выхода двигателя на пониженную частоту вращения по команде датчика точной остановки производится окончательное торможение.

Необходимая пониженная частота вращения может быть найдена опытным путем. Однако с помощью приведенных выше и в приложении 1 формул можно заранее, до выбора схемы, определить пониженную частоту вращения по заданной неточности остановки. Рассмотрим пример такого расчета.

Пример 1. Выбор пониженной частоты вращения двигателя для получения заданной точности остановки. Найти неточность остановки

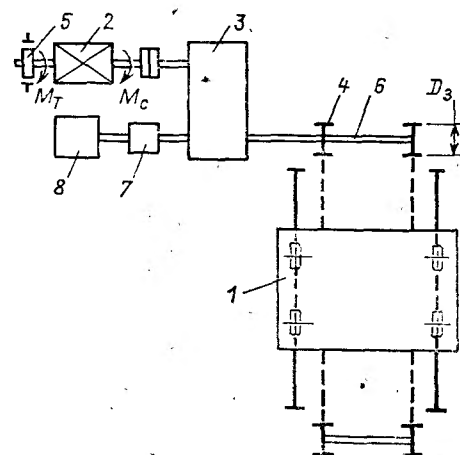


Рис. 4. Кинематическая схема привода тележки

Исходные данные

Ход тележки L	7 м
Требуемая точность остановки $\Delta s_{т, з}$	± 25 мм
Масса тележки m_t	3000 кг
Масса груза;	
максимальная m_{max}	15 000 кг
минимальная m_{min}	5000 кг
Скорость перемещения тележки v	0,6 м/с
Диаметр звездочки цепной передачи D_3	0,4 м

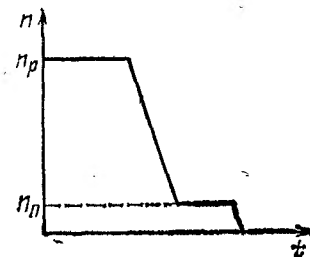


Рис. 3. График изменения частоты вращения при точной остановке электропривода:

n_p — рабочая частота вращения; n_n — пониженная частота вращения

тележки при торможении с полной рабочей скоростью и выбрать пониженную частоту вращения для получения заданной точности.

Кинематическая схема приведена на рис. 4. Тележка 1 приводится двигателем 2 через редуктор 3 и цепную передачу 4. На валу двигателя установлен тормоз 5. С выходным валом 6 через кинематический редуктор 7 связан командоаппарат 8.

Технические данные электродвигателя и тормоза

Тип двигателя	МТКФ 112-6
Номинальная мощность $P_{ном}$	5 кВт
Номинальная частота вращения $n_{ном}$	895 об./мин
Номинальный момент $M_{ном}$	53,4 Н·м
Маховой момент ротора GD^2_d	0,26 кгс·м ²
Тип тормоза	ТКП200/100
Момент тормоза M_T	50 Н·м
Передаточное число редуктора i_p	31,5
КПД редуктора η_p	0,95
Суммарное среднее время работы аппаратуры $t_{a,ср}$	0,2 с
Относительное отклонение времени работы аппаратуры $\Delta t_a/t_{a,ср}$	0,15
Погрешность командоаппарата КА4658 δ	$\pm 0,5\%$

Расчет 1. Передаточное число кинематического редуктора 7 выбирается из условия получения максимально возможного угла поворота барабана командоаппарата 330° при полном ходе тележки (см. § 5). Угловой путь вала 6 при ходе тележки на 7 м

$$\varphi = \frac{L}{\pi D_3} = \frac{7}{3,14 \cdot 0,4} = 5,57 \text{ оборота.}$$

Передаточное число кинематического редуктора

$$i_{к,р} = \frac{5,57}{330/360} = 6,08.$$

Общее передаточное число от двигателя к командоаппарату

$$i_{общ} = i_p i_{к,р} = 31,5 \cdot 6,08 = 191.$$

2. Статический момент нагрузки. Для тележек обычно принимается сопротивление движению F , равное 1,5% веса.

Максимальное сопротивление движению

$$F_{max} = 0,015(m_T + m_{max})g = 0,015(3000 + 15000) \cdot 9,81 = 2650 \text{ Н.}$$

Минимальное сопротивление движению

$$F_{min} = 0,015(3000 + 5000) \cdot 9,81 = 1180 \text{ Н.}$$

Максимальный статический момент на валу двигателя

$$M_{c,max} = \frac{F_{max} D_3}{2 i_p \eta_p} = \frac{2650 \cdot 0,4}{2 \cdot 31,5 \cdot 0,95} = 17,7 \text{ Н·м.}$$

Минимальный статический момент

$$M_{c,min} = \frac{F_{min} D_3}{2 i_p \eta_p} = \frac{1180 \cdot 0,4}{2 \cdot 31,5 \cdot 0,95} = 7,88 \text{ Н·м.}$$

Среднее значение статического момента

$$M_{c,ср} = \frac{M_{c,max} + M_{c,min}}{2} = \frac{17,7 + 7,88}{2} = 12,8 \text{ Н·м.}$$

3. Среднее значение динамического момента

$$M_{дин,ср} = M_T + M_{c,ср} = 50 + 12,8 = 62,8 \text{ Н·м.}$$

Максимальный динамический момент

$$M_{дин,max} = M_T + M_{c,max} = 50 + 17,7 = 67,7 \text{ Н·м.}$$

Относительное отклонение динамического момента

$$\frac{\Delta M_{дин}}{M_{дин,ср}} = \frac{M_{дин,max} - M_{дин,ср}}{M_{дин,ср}} = \frac{67,7 - 62,8}{62,8} = 0,078.$$

4. Относительное отклонение частоты вращения. По механической характеристике двигателя для максимального и минимального статических моментов находим частоты вращения при рабочем ходе $n_{p,min}$ и $n_{p,max}$, среднюю частоту вращения $n_{p,ср}$, а затем и относительное отклонение частоты вращения:

$$n_{p,ср} = 940 \text{ об./мин; } \frac{\Delta n_p}{n_{p,ср}} = \frac{n_{p,max} - n_{p,min}}{n_{p,ср}} \approx 0,03.$$

5. Момент инерции ротора двигателя, тормозного шкива, муфты и редуктора

$$J_1 = \frac{1,25 GD^2_d}{4} = \frac{1,25 \cdot 0,26}{4} = 0,081 \text{ кг·м}^2.$$

(Коэффициент 1,25 служит для приближенного учета моментов инерции тормозного шкива, муфты и редуктора.)

6. Суммарный момент инерции движущихся частей, приведенный к валу двигателя

Максимальный суммарный приведенный момент генерации

$$J_{max} = J_1 + \frac{91,2(m_T + m_{max})v^2}{n_{ном}^2} = 0,081 + \frac{91,2(3000 + 15000) \cdot 0,6^2}{895^2} = 0,819 \text{ кг·м}^2.$$

Минимальный суммарный приведенный момент инерции

$$J_{min} = J_1 + \frac{91,2(m_T + m_{min})v^2}{n_{ном}^2} = 0,081 + \frac{91,2(3000 + 5000) \cdot 0,6^2}{895^2} = 0,409 \text{ кг·м}^2.$$

Среднее значение момента инерции

$$J_{ср} = \frac{J_{max} + J_{min}}{2} = \frac{0,819 + 0,409}{2} = 0,614 \text{ кг·м}^2.$$

Относительное отклонение момента инерции

$$\frac{\Delta J}{J_{ср}} = \frac{J_{max} - J_{ср}}{J_{ср}} = \frac{0,819 - 0,614}{0,614} = 0,334.$$

7. Максимальная неточность остановки вала двигателя. По (8) неточность углового пути

$$\Delta\varphi_{г, max} = \frac{0,5 \cdot 191}{360} + \frac{940 \cdot 0,2}{60} (0,03 + 0,15) + \frac{0,614 \cdot 940^2}{1146 \cdot 62,8} (2 \cdot 0,03 + 0,334 + 0,078) = 0,265 + 0,565 + 3,56 = 4,39 \text{ оборота.}$$

8. Максимальная неточность остановки тележки

$$\Delta s_{г, max} = \pm \frac{\pi \Delta\varphi_{г, max} D_3}{i_p} = \pm \frac{3,14 \cdot 4,39 \cdot 0,4}{31,5} = \pm 0,175 \text{ м} = \pm 175 \text{ мм.}$$

Полученная при одноступенчатом торможении неточность остановки превышает заданную, поэтому необходимо перед остановкой переключить двигатель на пониженную частоту вращения.

9. Определение среднего значения необходимой пониженной частоты вращения $n_{п, ср}$. Подставив в предыдущую формулу значение $\Delta s_{г, з} = \pm 25$ мм, найдем допустимую неточность остановки вала двигателя:

$$\Delta\varphi_{г, доп} = \pm 0,625 \text{ оборота;}$$

по (8) получим уравнение для $n_{п, ср}$:

$$A n_{п, ср}^2 + B n_{п, ср} - C = 0,$$

где

$$A = \frac{J_{ср}}{1146 M_{дин, ср}} \left(2 \frac{\Delta n_{п}}{n_{п, ср}} + \frac{\Delta J}{J_{ср}} + \frac{\Delta M_{дин}}{M_{дин, ср}} \right);$$

$$B = \frac{t_{а, ср}}{60} \left(\frac{\Delta n_{п}}{n_{п, ср}} + \frac{\Delta t_{а}}{t_{а, ср}} \right);$$

$$C = \Delta\varphi_{г, доп} - \frac{\delta i}{360}.$$

Относительное отклонение частоты вращения на искусственной характеристике пониженной частоты вращения зависит от жесткости этой характеристики.

Примем $\Delta n_{п}/n_{п, ср} = 0,1$;

$$A = \frac{0,614}{1146 \cdot 62,8} (2 \cdot 0,1 + 0,334 + 0,078) = 0,53 \cdot 10^{-5};$$

$$B = \frac{0,2}{60} (0,1 + 0,15) = 0,835 \cdot 10^{-3};$$

$$C = 0,625 - 0,265 = 0,36.$$

Получаем квадратное уравнение $0,53 \cdot 10^{-5} n_{п, ср}^2 + 0,835 \cdot 10^{-3} n_{п, ср} - 0,36 = 0$.

Решив уравнение, находим искомое значение пониженной частоты вращения $n_{п, ср} = 193$ об/мин.

Часто неточность остановки определяют приближенно. При этом считают, что погрешность пути торможения равна половине пути за время снижения частоты вращения. Это соответствует допущению, что погрешностями переключающих аппаратов (датчиков, реле, контактов и т. д.) можно пренебречь, а наложенные неточности начальной частоты вращения n_i , моментов сопротивления M_c и инерции J приводит к ошибке не более 50% расчетного пути торможения $\Delta\varphi_{г, max} = \pm \varphi'''_{г}/2$.

В нашем примере погрешность углового пути

$$\Delta\varphi_{г, max} = \pm \frac{J_{max} n_i^2}{2 \cdot 1146 (M_{г} + M_{с, max})} = \pm \frac{0,819 \cdot 940^2}{2 \cdot 1146 \cdot 67,7} = \pm 4,66 \text{ оборота.}$$

Неточность остановки тележки при торможении с высокой частоты вращения

$$\Delta s_{г, max} = \pm \frac{3,14 \cdot 4,66 \cdot 0,4}{31,5} = \pm 0,186 \text{ м} = \pm 186 \text{ мм.}$$

Для привода одного и того же механизма можно выбрать двигатель с большей или меньшей номинальной частотой вращения. Чтобы получить заданную скорость движения механизма, рассчитывают необходимое передаточное число редуктора. Рассмотрим влияние этих параметров на тормозной путь и точность остановки электропривода при торможении в одну ступень для двух случаев:

1) приведенный момент инерции механизма $J_{мех}$ существенно больше момента инерции двигателя J_d . Условие $J_{мех} \gg J_d$ обычно соответствует быстроходным механизмам или механизмам с большой массой;

2) $J_d \gg J_{мех}$ — это условие характерно для тихоходных механизмов и механизмов с малой массой.

1. Анализ выполним на примере конкретного механизма — передаточной тележки с приводом, мощностью 6,3 кВт, на выходном валу которого действует статический момент нагрузки $M_c = 1200$ Н. Приведенный к этому валу момент инерции тележки $J_{мех} = 540$ кг·м². Сравнение проведем для приводов с асинхронными двигателями серии 4А с числом полюсов 2—8.

Рассмотрим два вида торможения: механическое торможение наложением тормоза с моментом $M_{т} = 1,5 M_{ном}$ и

динамическое торможение¹ постоянным током, сила которого равна утроенному току холостого хода статора.

При неизменном в процессе замедления тормозном моменте путь торможения определяется по (4). Для случая динамического торможения механическая характеристика разбивается на два-три прямолинейных участка и путь находится по формуле (П7). Результаты расчетов для нашего примера представлены в табл. 1 и на рис. 5.

Таблица 1. Зависимость тормозного пути от номинальной частоты вращения двигателя серии 4А

Номинальная частота вращения $n_{ном}$, об/мин	Передаточное число редуктора i_p	Номинальный момент $M_{ном}$, Н·м	Приведенный статический момент M_c , Н·м	Суммарный момент инерции J , кг·м ²	Механическое торможение		Динамическое торможение	
					Динамический момент $M_{дин}$, Н·м	Угловой путь торможения φ_t , оборотов	Динамический момент (эквивалентный) $M_{дин, эк}$, Н·м	Угловой путь торможения φ_t , оборотов
2800	94	21,5	12,8	0,07	44,9	10,5	22,6	21,1
1400	47	43	25,6	0,27	90,4	5,1	45,2	10,1
940	31,5	64	38,4	0,58	134,1	3,3	67,8	6,6
690	23,2	87,2	52,3	1,06	182,5	2,4	88,6	5

С уменьшением номинальной частоты вращения суммарный момент инерции J быстро увеличивается, однако рост инерционности системы компенсируется уменьшением квадрата частоты вращения. Поскольку динамический тормозной момент заметно возрастает, угловой путь торможения вала двигателя уменьшается. Соответствующие кривые для случаев механического ($\varphi_{т,м,т}$) и динамического ($\varphi_{т,д,т}$) торможения показаны на рис. 5. Если номинальная частота вращения и соответственно передаточное число редуктора уменьшены в 4 раза, то путь при механическом торможении сокращается в 4,5 раза, а при динамическом торможении — в 4,2 раза. Пропорционально повышается точность остановки вала двигателя. Однако тормозной путь и точность остановки механизма мало меняются, так как в варианте тихоходного двигателя их значения делятся на уменьшенное в 4 раза передаточное число редуктора.

¹Режим динамического торможения описан в § 2.

2. Когда $J_d \gg J_{мех}$, можно принять $J_{ср} \approx J_d$ и тогда тормозной путь механизма пропорционален выражению $\frac{J_d n^2}{M_{дин}}$.

Момент инерции двигателя средней мощности серий 4А, ВАО, В и т. п. с уменьшением синхронной частоты вращения в 4 раза (с 3000 до 750 об/мин) увеличивается в 5—10 раз, n^2 уменьшается в 16 раз, а $M_{дин}$ увеличивается

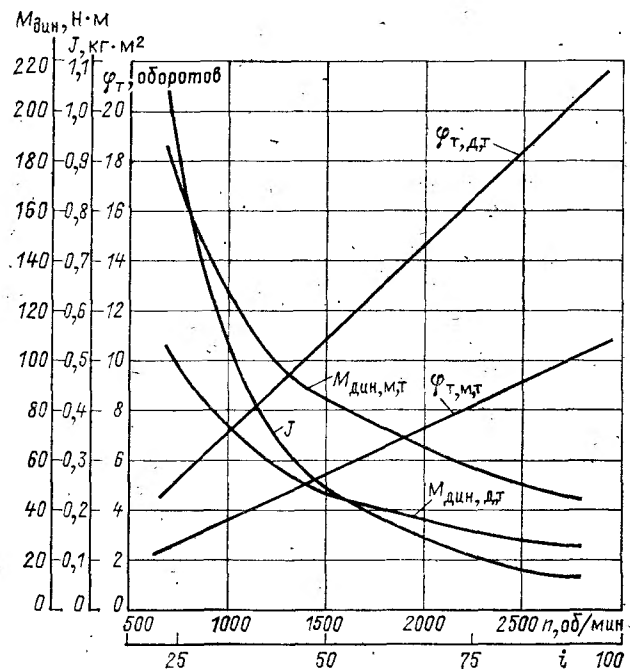


Рис. 5. Зависимости динамического момента, суммарного момента инерции и пути торможения от номинальной частоты вращения двигателя и передаточного числа редуктора

примерно в 4 раза. В результате уменьшение передаточного числа редуктора в 4 раза приводит к уменьшению тормозного пути и неточности остановки механизма в 1,5—3 раза.

Так как в большинстве реальных приводов $J_d > J_{мех}$, для уменьшения погрешности тормозного пути механизма следует выбирать тихоходные двигатели. Анализ показал, что при этом уменьшаются также пики момента при ударах, стопорении или заклинивании механизма [2].

2. ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ТОРМОЖЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

От правильного выбора способа торможения зависят как точность остановки электропривода, так и длительность переходных процессов замедления, т. е. производительность механизма.

При двухступенчатом позиционировании эффективное торможение обеспечивает форсированный переход механизма с рабочей на пониженную скорость и затем быстрое окончательное затормаживание при стабильных значениях пути и точности остановки.

Часто требуемая точность остановки механизма может быть достигнута без предварительного перехода на пони-

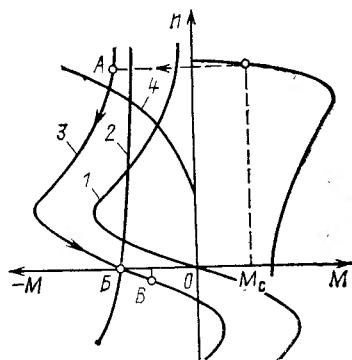


Рис. 6. Механические характеристики асинхронного двигателя в тормозных режимах:

1 — динамическое торможение; 2 — торможение противовключением; 3 — двухтоковое торможение; 4 — конденсаторное торможение

женную скорость путем торможения с рабочей скорости до остановки. Так, нет необходимости усложнять схему для получения «ползучей» скорости, если основная рабочая скорость механизма невелика, момент инерции мал, а статический момент нагрузки значителен и мало меняется. В этих случаях осуществляется одноступенчатое позиционирование путем эффективного торможения, обеспечивающего малый тормозной путь при небольших отклонениях тормозного момента от заданных значений.

Для осуществления точной остановки находят применение следующие способы электрического торможения: динамическое, противовключением, магнитное и конденсаторное. В последние годы получили распространение комбинированные способы торможения: конденсаторно-динамическое, конденсаторно-магнитное, магнитно-динамическое и двухтоковое (сочетание режимов торможения противовключением и динамического). Рекуперативное торможение используется как промежуточный этап при переходе с высокой частоты вращения на пониженную (см. § 3). Механические характеристики асинхронного двигателя в тормозных режимах даны на рис. 6.

Для быстрого затормаживания широко применяют также электромагнитные и электрогидравлические колодочные тормоза. При их использовании энергия торможения выделяется в тормозе, а не в двигателе. Тормоза обеспечивают надежное замедление при отключении сети. Однако они требуют частой подрегулировки, смены тормозных колодок, отличаются значительными колебаниями тормозного механизма, не обеспечивают плавности замедления, имеющей важное значение для многих механизмов. Поэтому при высоких требованиях к точности остановки рекомендуется применение электрического торможения. Если механический тормоз необходим для удержания механизма в заданном положении, его следует использовать лишь на заключительном этапе торможения.

Динамическое торможение. По сравнению с механическим динамическое торможение отличается плавностью; несмотря на увеличенный тормозной путь, оно обеспечивает большую точность позиционирования, так как развиваемый двигателем тормозной момент более стабилен, чем момент колодочного тормоза.

Для перевода асинхронного двигателя в режим динамического торможения статор отключают от трехфазной сети и в его обмотки подают постоянный ток. При этом обычно используют схему рис. 7 с подключением к источнику постоянного тока обмоток двух фаз статора, соединенных последовательно.

В двигателе образуется неподвижное магнитное поле статора, которое наводит ЭДС в обмотках вращающегося ротора. Эта ЭДС индуцирует ток в роторе; взаимодействие поля статора с магнитным полем тока ротора создает тормозной момент. Двигатель замедляется, и при остановке ротора уменьшаются до нуля ЭДС, ток ротора и тормозной момент.

Механические характеристики асинхронных двигателей серий МТН (с фазным ротором) и МТКН (с короткозамкнутым ротором) в режиме динамического торможения приведены на рис. 8. Отношение постоянного тока в двух фазах статора к току статора при холостом ходе двигателя принято равным 3. Характеристики 1, 2 и 3 относятся к

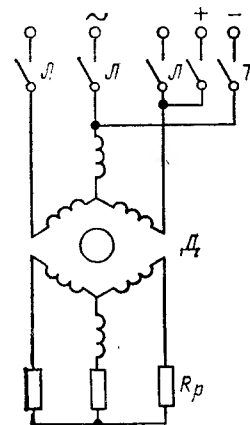


Рис. 7. Схема динамического торможения

двигателю с фазным ротором и построены для трех значений активных сопротивлений цепи ротора $R_{p*} = 0,2; 0,4$ и 1 соответственно; характеристика 4 относится к двигателю с короткозамкнутым ротором. Моменты двигателя M , частоты вращения и сопротивления R_p выражены в долях единицы, т. е. в долях номинальных значений

$$M_* = M/M_{\text{ном}}; n_* = n/n_0; R_{p*} = R_p/R_{p,\text{ном}},$$

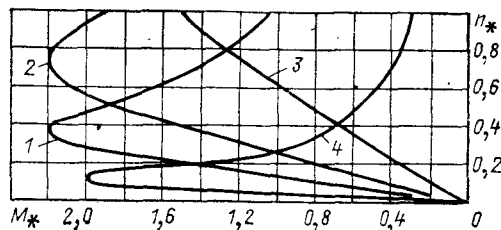


Рис. 8. Механические характеристики двигателей в режиме динамического торможения

где $M_{\text{ном}}$ — номинальный момент двигателя; n_0 — синхронная частота вращения; $R_{p,\text{ном}}$ — номинальное сопротивление, определяемое по ЭДС на кольцах E_p и номинальному току ротора $I_{p,\text{ном}}$:

$$R_{p,\text{ном}} = \frac{E_p}{\sqrt{3}I_{p,\text{ном}}} \quad (10)$$

Сравнение характеристик 1—4 показывает, что у двигателя с короткозамкнутым ротором тормозные моменты при высоких частотах вращения очень малы. Среднее значение момента равно $(0,5—0,7) M_{\text{ном}}$. Соответственно путь торможения получается большим. Поэтому для двигателей с короткозамкнутым ротором рекомендуется сочетание динамического торможения с конденсаторным или магнитным (см. ниже). На рис. 9,а показаны зависимости пути торможения от статического момента на валу для двигателя с короткозамкнутым ротором МТКН и двигателя с фазным ротором МТН при трех различных сопротивлениях добавочных резисторов в цепи ротора¹. Отношение постоянного тока статора к току статора при холостом ходе принималось равным 2,5. Анализ показывает, что путь торможения двигателя МТКН в 2,1—2,9 раза больше, чем путь торможения двигателя МТН (при изменении статического момента от 100 до 50%) при оптимальном значении сопротивления цепи ротора.

¹ Углы φ_t даны в процентах; за 100% принят угловой путь торможения асинхронного двигателя МТКН при $M_{c*} = 1$.

рис. 9. Влияние резисторов в цепи ротора и статического момента на путь торможения (а) и точность остановки (б) при динамическом торможении

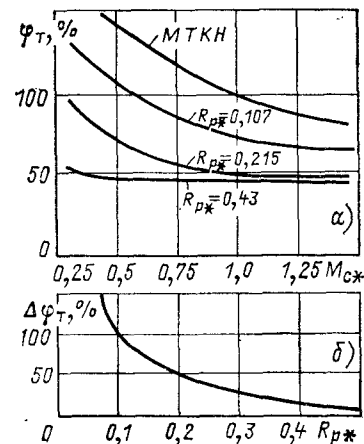
На рис. 9,б приведена кривая изменения неточности остановки асинхронного двигателя с фазным ротором в функции сопротивления цепи ротора¹ при изменении статического момента на валу M_c от $0,4 M_{\text{ном}}$ до $1,5 M_{\text{ном}}$. Оптимальное значение активного сопротивления в цепи ротора, обеспечивающее минимальный

путь торможения и максимальную точность остановки, находится в пределах $R_p = 0,35—0,45$. С увеличением R_{p*} в 4,5 раза (от 0,1 до 0,45) точность остановки при указанных пределах изменения M_c повышается в 8 раз.

Для иллюстрации приведем в абсолютных значениях расчетные данные времени и пути динамического торможения крановых двигателей серий МТН, МТКН мощностью 30 кВт, 720 об/мин при статическом моменте на валу $M_c = 0,1 M_{\text{ном}}$, моменте инерции механизма $J_{\text{мех}} = 2J_d$ и отношении постоянного тока к току статора при холостом ходе, равном 3. Время торможения двигателя МТН при полном сопротивлении роторной цепи $R_{p*} = 0,4$ равно 1,2 с, путь торможения $\varphi_t = 4$ оборота вала; соответствующие значения для двигателя МТКН равны 1,7 с и 12 оборотов вала двигателя.

Из сравнения характеристик рис. 8 видно, что дальнейшее повышение эффективности динамического торможения двигателей с фазным ротором может быть достигнуто путем переключения резисторов в цепи ротора: вначале включают добавочное сопротивление, соответствующее полному сопротивлению $R_{p1} = 0,4 R_{p,\text{ном}}$, а после снижения частоты вращения в 2 раза шунтируют часть резисторов в роторе, уменьшая полное сопротивление до значения $R_{p2} = 0,2 R_{p,\text{ном}}$.

¹ Углы $\Delta\varphi_t$ даны в процентах; за 100% принята угловая погрешность остановки вала двигателя МТН при $R_{p*} = 0,1$.



Резистор R_d в цепи постоянного тока выбирают из условия ограничения постоянного тока в статоре I_n значением, равным трехкратному току статора при холостом ходе двигателя $I_{с.х.}$ Сопротивление резистора R_d можно рассчитать по формуле

$$R_d = \frac{U_n}{I_n} - (2R_c + R_{пр}), \quad (11)$$

где U_n — напряжение источника постоянного тока; I_n — постоянный ток в обмотке статора; R_c — сопротивление фазы статора; $R_{пр}$ — сопротивление проводов.

Преимущества динамического торможения: высокая плавность, надежность и долговечность. Настройки и регулировки практически не требуется. Ударные моменты не превышают $2 M_{ном.}$

Торможение противовключением и двухтоковое. Как известно, режим торможения противовключением асинхронного двигателя возникает при вращении двигателя против поля, когда изменяется порядок чередования фаз статора. Этот метод торможения отличается эффективностью, так как момент двигателя значителен ($1,5-2 M_{ном.}$) и мало меняется в течение всего времени замедления (см. кривую 2 на рис. 6).

В конце процесса торможения двигатель должен быть своевременно отключен от сети, чтобы предотвратить его реверс. Применение реле времени для контроля остановки при торможении противовключением невозможно из-за разброса выдержек времени, неустойчивости нагрузки и напряжения сети. Поэтому в классических схемах торможения противовключением используют реле скорости или реле ЭДС ротора. Однако погрешности срабатывания этих аппаратов приводят к значительной погрешности позиционирования.

Торможение противовключением неприменимо при большом числе включений двигателя, так как вызывает его повышенный нагрев: потери энергии в двигателе примерно в 3 раза выше, чем при динамическом торможении. К недостаткам этого вида торможения относятся также значительные ударные моменты при переключении двигателя, которые могут в 10 раз и более превышать номинальный момент двигателя.

Двухтоковое торможение осуществляется путем одновременной подачи в обмотки статора переменного и постоянного токов. В момент начала торможения изменяет-

ся порядок чередования фаз статора. Механическая характеристика 3 асинхронного двигателя при двухтоковом торможении получается в результате суммирования механических характеристик режимов динамического торможения 1 и противовключения 2 (см. рис. 6). Во втором квадранте двигатель развивает значительные тормозные моменты, обеспечивающие быстрое замедление (переход из точки А в точку Б). Если при $n=0$ двигатель не отключить от сети, он реверсируется и работает при низкой («ползучей») частоте вращения (точка В). В отличие от торможения противовключением в схемах двухтокового торможения можно применять для управления процессом реле времени.

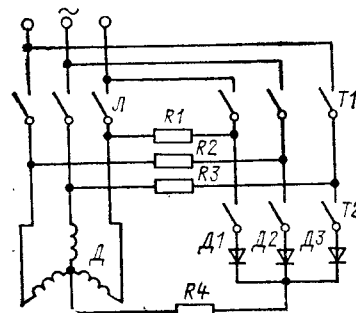


Рис. 10. Схема симметричного двухтокового торможения

Одна из рекомендуемых схем симметричного двухтокового торможения (с подачей постоянного тока в обмотки всех трех фаз статора) показана на рис. 10. Настройка эффективности торможения производится резисторами $R1-R3$, уровня «ползучей» частоты вращения — резистором $R4$.

Магнитное и магнитно-динамическое торможение. В асинхронном двигателе можно создать тормозной момент после отключения от сети, используя энергию затухающего магнитного поля. Такой способ иногда называют

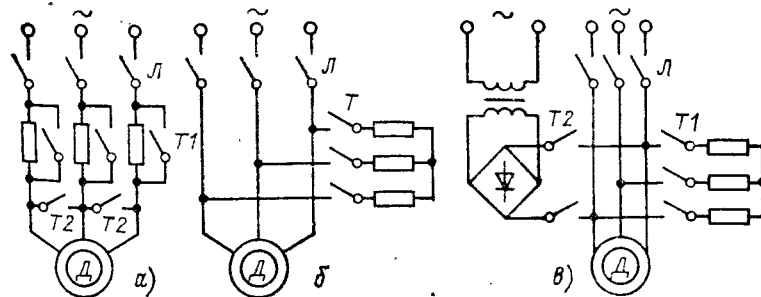


Рис. 11. Схемы магнитного торможения с токоограничивающими (а) и разрядными (б) резисторами и схема магнитно-динамического торможения (в)

торможением коротким замыканием, так как простейшим схемным решением является замыкание накоротко обмотки статора. В последние годы этот способ получил более точное название — магнитное торможение.

Схемы переключения двигателя в режим магнитного торможения показаны на рис. 11. Наиболее эффективен этот способ торможения для малоинерционных электроприводов малой мощности. К малоинерционным приводам относятся такие, у которых приведенный к валу двигателя момент инерции механизма не превышает двукратного момента инерции двигателя. В двигателе мощностью до 1 кВт возможно поглощение более 85% кинетической энергии, запасенной ротором при номинальной частоте вращения. С увеличением мощности двигателя момент инерции ротора растет быстрее, чем энергия магнитного поля. Поэтому эффективность магнитного торможения снижается.

В начале режима короткого замыкания статора при номинальной частоте вращения пик момента на валу в 4—7 раз превышает номинальный момент двигателя [3]. При этом двигатель интенсивно (за время 0,02—0,06 с) тормозится. Тормозной путь составляет доли оборота вала двигателя. Для короткого замыкания статора двигателей мощностью до 1 кВт используют обычно вспомогательные контакты линейного контактора.

Уменьшение пиков момента в 1,5—2 раза без уменьшения эффективности торможения достигается введением в цепь статора резисторов (рис. 11,б). Сопротивление резисторов должно в 4—5 раз превышать активное сопротивление фазы статора.

Наиболее эффективно магнитное торможение в сочетании с динамическим и конденсаторным торможением. Схема магнитно-динамического торможения (МДТ) дана на рис. 11,а. На первом этапе включается контактор $T1$ и двигатель быстро замедляется в режиме магнитного торможения. После затухания магнитного потока отключается контактор $T1$ и включается контактор динамического торможения $T2$. Двигатель останавливается.

Применение МДТ для малоинерционных приводов мощностью до 7 кВт вместо динамического торможения при одном и том же значении постоянного тока уменьшает время торможения в 1,4—2 раза, а путь торможения — в 3—4 раза. Для приводов мощностью до 1 кВт время и путь торможения уменьшаются еще значительно. За счет резкого уменьшения тормозного пути существенно увеличивается точность остановки электропривода [3, 4].

Конденсаторное торможение и его сочетание с динамическим и магнитным. Конденсаторное торможение асинхронных двигателей малой мощности и комбинированные способы торможения с его использованием в последние годы получили значительное распространение. С точки зрения быстроты остановки, сокращения тормозного пути и повышения точности указанные виды торможения часто дают лучшие результаты. Конденсаторное торможение основано на использовании явления самовозбуждения асинхронной машины. В отличие от динамического и рекуперативного оно не требует потребления возбуждающей энергии из сети.

На рис. 12,а приведена схема включения двигателя при конденсаторном торможении. Параллельно обмотке статора включают конденсаторы, обычно соединенные по схеме треугольника. При отключении двигателя от сети токи разряда конденсаторов создают магнитное поле, вращающееся с низкой угловой скоростью. Машина переходит в режим генераторного торможения, частота вращения снижается до значения, соответствующего частоте вращения возбужденного поля. Во время разряда конденсаторов по-

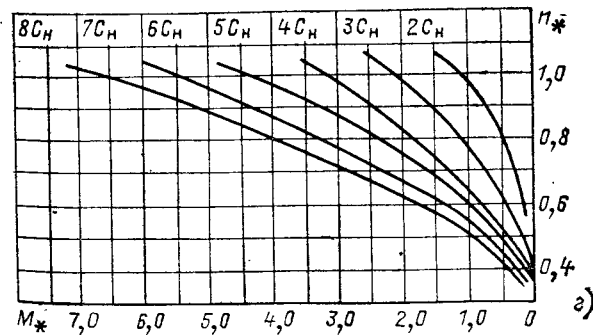
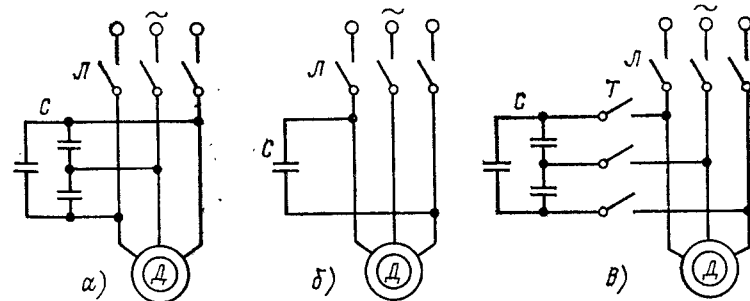


Рис. 12. Конденсаторное торможение асинхронных двигателей

является большой тормозной момент, который с уменьшением частоты вращения падает. В начале торможения происходит быстрое поглощение запасенной ротором кинетической энергии при малом тормозном пути. Торможение резкое, ударные моменты достигают $7 M_{\text{ном}}$. Значение пика тормозного тока при самых больших значениях емкости не превышает пускового тока. Среднее значение момента составляет $0,5-1 M_{\text{ном}}$.

На рис. 12,2 построены тормозные характеристики двигателей единой серии малой мощности для разных емкостей. Номинальной емкостью $C_{\text{ном}}$ считается такая емкость, которая обеспечивает полную компенсацию реактивной составляющей тока статора двигателя при номинальной нагрузке.

Как видно из кривых рис. 12,2, с ростом емкости конденсаторов тормозной момент увеличивается и торможение длится до более низкой частоты вращения. Исследования показали, что оптимальное значение емкости лежит в пределах $4-6 C_{\text{ном}}$ [3].

Для сети частотой 50 Гц значение номинальной емкости конденсаторов при соединении их треугольником, а обмотки статора в звезду подсчитывается по формуле, мкФ,

$$C_n = 1840 \frac{I_0}{U_{\text{ном}}}, \quad (12)$$

где I_0 — ток намагничивания двигателя (на фазу); $U_{\text{ном}}$ — номинальное линейное напряжение.

При $U_{\text{ном}} = 380$ В получаем, мкФ, $C_n = 4,85 I_0$.

Конденсаторное торможение прекращается при частоте вращения 30—40% номинальной, когда частота вращения ротора становится равной частоте вращения поля статора от возникающих в статоре свободных токов. При этом в процессе торможения поглощается более 3/4 кинетической энергии, запасенной приводом. Для полной остановки двигателя по схеме рис. 12,а необходимо наличие на валу момента сопротивления.

Описанная схема выгодно отличается отсутствием переключающих аппаратов, простотой обслуживания, надежностью и экономичностью.

При глухом подключении конденсаторов параллельно двигателю можно применять только такие типы конденсаторов, которые рассчитаны на длительную работу в цепи переменного тока. К ним относятся конденсаторы следующих типов: МБГЧ на напряжение 500 В, КМ1, КМ2 и КС1 на 380 В, а также КБГ-МН на 600 В при повторно-кратко-

временном режиме работы электропривода (при ПВ < 50%) и 1000 В при продолжительном режиме работы.

Если торможение осуществляется по схеме рис. 12,в с подключением конденсаторов после отключения двигателя от сети, возможно применение более дешевых и малогабаритных металлобумажных конденсаторов типов МБГП и МБГО, предназначенных для работы в цепях постоянного и пульсирующего тока, а также сухих полярных электролитических конденсаторов (КЭ, КЭГ и др.).

Конденсаторное торможение с глухо подключенными по схеме треугольника конденсаторами целесообразно применять для быстрой и точной остановки электроприводов, на валу которых действует момент нагрузки не менее 25% номинального момента двигателя.

Для конденсаторного торможения может быть применена и упрощенная схема: однофазное включение конденсаторов (рис. 12,б). Для получения такого же тормозного эффекта, как при трехфазном включении емкости, необходимо, чтобы емкость конденсатора в однофазной схеме была в 2,1 раза больше емкости в каждой фазе в схеме на рис. 12,а. При этом, однако, емкость в однофазной схеме составляет лишь 70% суммарной емкости конденсаторов при их трехфазном включении.

Потери энергии в двигателе при конденсаторном торможении наименьшие по сравнению с другими видами торможения, поэтому оно рекомендуется для электроприводов с большим числом включений. При выборе аппаратуры следует учесть, что контакторы в цепи статора должны быть рассчитаны на ток, протекающий по конденсаторам.

Для устранения недостатка конденсаторного торможения — прекращения действия до полной остановки двигателя — используют его сочетания с динамическим и

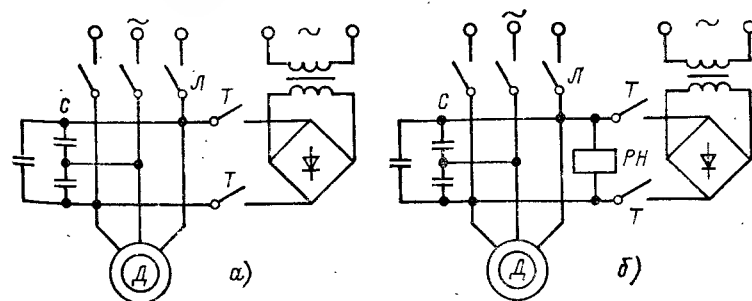


Рис. 13. Схемы конденсаторно-динамического торможения

магнитным торможением, предложенные проф. Л. П. Петровым.

Две основные схемы конденсаторно-динамического торможения (КДТ) представлены на рис. 13. В схеме рис. 13,а постоянный ток подают в статор после прекращения действия конденсаторного торможения. Эта схема рекомендуется для точной остановки электропривода. Подачу постоянного тока следует производить в функции пути механизма. При сниженной частоте вращения момент динамического торможения значителен, что и обеспечивает быстрое окончательное затормаживание двигателя.

Эффективность такого двухступенчатого торможения видна из следующего примера. При динамическом торможении двигателя АЛ41-4 (1,7 кВт, 1440 об/мин) с внешним моментом инерции на валу, составляющим 22% момента инерции ротора, время торможения равно 0,6 с, а тормозной путь 11,5 оборота вала. При совмещении конденсаторного и динамического торможения время и путь торможения сокращаются до 0,16 с и 1,6 оборота вала (емкость конденсаторов была принята равной $3,9 C_{ном}$).

В схеме рис. 13,б осуществляется перекрытие режимов с подачей постоянного тока до окончания процесса конденсаторного торможения. Для управления вторым этапом служит реле напряжения РН. Конденсаторно-динамическое торможение по схеме рис. 13,б позволяет снизить время и путь торможения в 4—5 раз по сравнению с КДТ по схеме рис. 13,а. Однако отклонения времени и пути от их средних значений при последовательном действии режимов конденсаторного и динамического торможения в 2—3 раза меньше, чем в схеме с перекрытием режимов.

Конденсаторно-магнитное торможение (КМТ) отличается интенсивным процессом снижения частоты вращения, меньшими потерями энергии, простотой схем (рис. 14). На

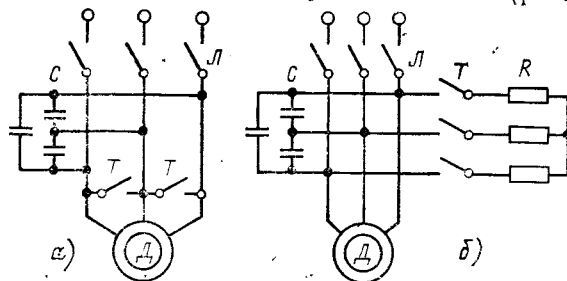


Рис. 14. Схемы конденсаторно-магнитного торможения:

а — простейшая схема; б — схема с ограничением пика момента в начале магнитного торможения

первом этапе действует конденсаторное торможение, при котором активно поглощается основная часть кинетической энергии вращающихся масс при магнитном потоке двигателя, значительно превосходящем номинальное значение. Благодаря этому особенно интенсивно проходит магнитное торможение на втором этапе замедления электропривода. Время торможения на этом этапе измеряется сотыми долями секунды. Для малоинерционных приводов емкость конденсаторов может быть небольшой и замедление в основном происходит за счет второго этапа — магнитного торможения.

При испытаниях в схеме КМТ время торможения двигателя АО41-5 (1 кВт, 930 об/мин) с конденсаторами 3×32 мкФ ($3,8 C_{ном}$) при работе вхолостую с небольшим моментом инерции на валу (15% момента инерции ротора) составило всего 0,05 с. Вал двигателя успевал повернуться на 0,4 оборота.

Важной особенностью КМТ является его высокая стабильность, зависящая только от разбросов времени срабатывания аппаратуры. В среднем при колебаниях напряжения сети в пределах $\pm 20\%$, а момента нагрузки и момента инерции — до $\pm 50\%$ отклонения тормозного пути и времени торможения от заданных значений не превышают соответственно $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$.

Конденсаторно-магнитное торможение наиболее эффективно для двух-, четырех- и шестиполусных двигателей единых серий 4А, АО2 и т. п. Для восьмиполусных двигателей этот вид торможения дает худшие результаты из-за их большей инерционности. Конденсаторно-магнитное торможение менее эффективно и для краново-металлургических двигателей (МТКН и др.), отличающихся повышенными значениями активных сопротивлений обмоток, момента инерции и тока намагничивания.

Для торможения двигателей единой серии мощностью до 10 кВт при $J/J_{д} \leq 2$ рекомендуется схема КМТ, показанная на рис. 14,а. Оптимальное значение емкости конденсаторов равно 4—5 $C_{ном}$; длительность первого этапа торможения составляет 0,04—0,08 с. Если необходимо ограничить пик момента в начале этапа магнитного торможения, следует использовать схему рис. 14,б с включением последовательно с обмотками статора резисторов R , сопротивление которых в 3—6 раз должно превышать активное сопротивление фазы статора. Для плавного замедления с последующей точной остановкой управление второй ступенью торможения производят в функции частоты вращения электропривода или напряжения на статоре.

Для двигателей мощностью 10—15 кВт, а также для приводов с отношением $I/I_d > 2$ емкость конденсаторов необходимо увеличивать. При этом для снижения первого пика тормозного момента блок конденсаторов подключают через резисторы, сопротивление которых равно (0,2—0,4)

$$\frac{U_{ном}}{I_{ном}}$$

Нагрев двигателя при КМТ в 2 раза меньше, чем при динамическом торможении. Поэтому этот способ выгодно применять для точной остановки приводов, работающих с большим числом включений.

Для двигателей средней и большой мощности конденсаторное торможение оказывается малоэффективным, так как запас энергии магнитного поля растет медленнее, чем момент инерции ротора.

Если для привода механизма используется асинхронный двигатель с фазным ротором, то пониженную частоту вращения в конце конденсаторного торможения можно получить путем переключения конденсаторов в цепь ротора, включив их последовательно с дросселями. Схема рис. 15, а позволяет получить низкую устойчивую частоту вращения (менее 2% синхронной). Нормально электродвигатель пускается при включенных контакторах Л, Л1 и КТ. После

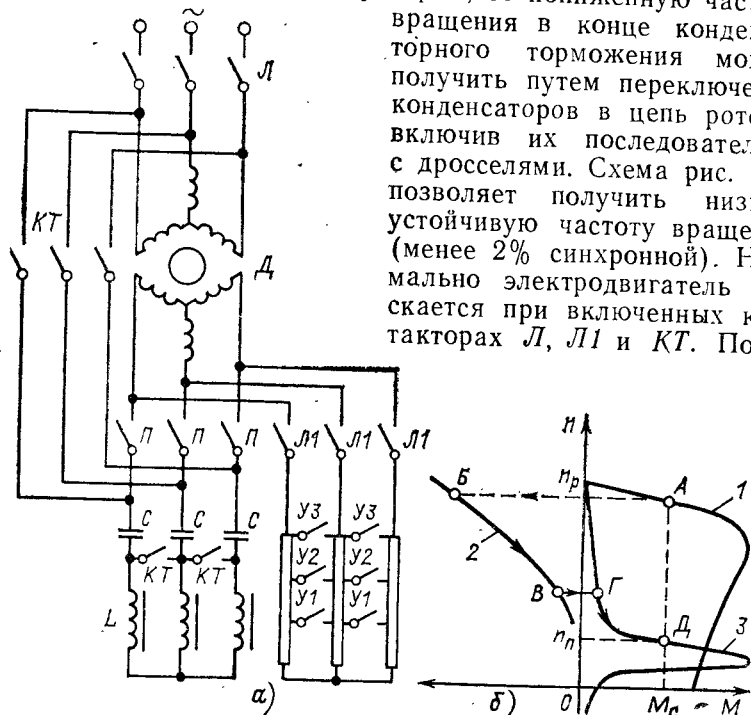


Рис. 15. Переключение конденсаторов в цепь ротора для получения пониженной частоты вращения:

а — схема; б — механические характеристики

срабатывания контакторов ускорения У1, У2 и У3 двигатель выходит на естественную характеристику 1 (рис. 15, б). При моменте сопротивления M_c привод работает на высокой частоте вращения n_p . Конденсаторы С включены в цепь статора. В первый период торможения отключается контактор Л, и двигатель переходит из точки А в режим конденсаторного торможения по характеристике 2 в точку Б. В конце этого этапа отключаются контакторы КТ и Л1 и включаются контакторы Л и Л. В каждую фазу ротора включаются последовательно соединенные емкость С и индуктивность L. Эти колебательные цепи С—L нормально представляют высокое сопротивление; ток и момент двигателя малы. При заранее выбранной низкой частоте вращения частота тока в роторе возрастает до резонансной, при которой сопротивление цепей С—L резко падает. В роторе появляется большой ток, создающий значительный момент. Характеристика двигателя в этом режиме построена на рис. 15, б (кривая 3). Двигатель из точки В переходит в точку Г и далее работает на жесткой характеристике при низкой частоте вращения в точке Д. Расчет индуктивности и емкости приведен в [5].

Конденсаторное торможение и его сочетания с динамическим и магнитным торможением применяют на металлорежущих станках, на некоторых вспомогательных металлургических механизмах и т. п.

Пример 2. Выбор конденсаторов. Рассчитать емкость и выбрать конденсаторы для торможения электродвигателя 4А132S6, 5,5 кВт, 380 В, 965 об/мин. Рассмотреть симметричное и несимметричное включение емкости.

1. Номинальная емкость

$$C_{ном} = 1840 \frac{I_0}{U_{ном}} = 1840 \frac{6,5}{380} = 31,5 \text{ мкФ.}$$

Ток холостого хода $I_0 = 6,5$ А.

2. Требуемая фазная емкость конденсаторов при трехфазном включении по схеме треугольника (рис. 12, а). Примем пятикратное значение емкости $C_3 = 5C_{ном} = 5 \cdot 31,5 = 157 \text{ мкФ.}$

Итак, требуются конденсаторы емкостью $3 \times 157 \text{ мкФ.}$ Выбираем трехфазный конденсатор типа КМ1-0,5-13-3, 500 В, $3 \times 165 \text{ мкФ.}$

3. При однофазном включении емкости (рис. 12, б) для получения равной эффективности торможения требуется емкость $C_1 = 2,1 C_3 = 2,1 \cdot 157 = 314 \text{ мкФ.}$

Максимальные значения ускорения и замедления. При выборе способа торможения и расчете параметров схемы

электропривода следует учитывать, что для многих производственных механизмов ограничиваются максимальные значения ускорения при пуске и замедления при остановке. Так, например, для устранения раскачивания груза, подвешенного на тросе, ускорение и замедление соответствующих грузоподъемных механизмов не должны превышать $0,1-0,2 \text{ м/с}^2$.

Допустимые значения ускорения a и замедления b машин и механизмов, транспортирующих в ковшах жидкие расплавы (чугун, сталь, шлак и т. п.), определяются из условия

$$a = b \leq g \tan \alpha,$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; α — допустимый угол наклона поверхности жидкого расплава под действием инерционных сил, который рассчитывают или определяют графически с учетом геометрической формы ковша и максимального уровня его заполнения. Обычно $a = b < 0,25 \text{ м/с}^2$.

Если в процессе замедления электропривода тормозной момент на валу двигателя меняется мало, например при торможении асинхронного двигателя противовключением, использовании механического тормоза и т. п., то время торможения вала электропривода от частоты вращения n до полной остановки равно, с,

$$t_r = \frac{Jn}{9,55(M_r + M_c)}. \quad (13)$$

Зная время торможения, можно определить значение замедления механизма с учетом его кинематической схемы. Так, для поступательно движущихся колесных механизмов замедление равно, м/с^2 ,

$$b = \frac{R_k(M_r + M_c)}{i_p J}, \quad (14)$$

где R_k — радиус колеса.

Если при торможении момент двигателя изменяется, например при конденсаторном и динамическом торможении, то по соответствующей механической характеристике (рис. 6) находят максимальный момент $M_{д, \max}$ и по его значению рассчитывают максимальное замедление

$$b_{\max} = \frac{R_k(M_{д, \max} + M_c)}{i_p J}.$$

Электроприводы самоходных механизмов должны также обеспечивать в процессе остановки плавное торможение для исключения пробуксовки колес по рельсам. Мак-

симально допустимый тормозной момент двигателя лимитируется критическим значением замедления $b_{кр}$, выше которого начинается буксование.

Коэффициент сцепления колеса с рельсом ϕ может изменяться в пределах $0,18-0,24$. Соответственно критическое значение замедления $b_{кр} = \phi g = 1,75-2,35 \text{ м/с}^2$.

Для исключения буксовки при минимальном коэффициенте сцепления тормозной момент двигателя не должен превышать

$$M_{д, \max} = \frac{1,75 i_p J}{R_k} - M_c. \quad (15)$$

3. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОНИЖЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В промышленности широко используют асинхронные двигатели — простые по конструкции, надежные и дешевые электрические машины. Хорошо известны способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей добавочными резисторами в роторе, снижением частоты тока, изменением числа полюсов статора. Для получения точной остановки первые два метода применяют редко.

Добавочные резисторы не могут обеспечить устойчивую низкую частоту вращения из-за мягкости механических характеристик; при малых моментах нагрузки существенно снизить частоту вращения невозможно.

Изменение частоты тока дает хорошие результаты. Однако для нерегулируемых электроприводов, требующих лишь точной остановки, этот метод в настоящее время используют редко из-за необходимости установки специального преобразователя частоты. Подробнее о питании током низкой частоты в схемах точной остановки см. ниже.

Многоскоростные двигатели с успехом применяют для получения точной остановки ряда механизмов, в частности лифтов. Однако многоскоростные двигатели единой серии 4А (с переключением числа полюсов обмотки статора) не имеют пониженной синхронной частоты вращения менее 500 об/мин (33% высокой частоты вращения). Для получения высокой точности остановки этого недостаточно. Крайовые двигатели серии МТКФ имеют 24-полюсную обмотку и соответственно синхронную частоту вращения 250 об/мин, однако их шкала мощностей ограничена.

Для решения задачи точной остановки электроприводов переменного тока созданы специальные схемы полу-

чения низких частот вращения двигателей. Несмотря на все разнообразие этих схем, подробно рассмотренных в настоящем параграфе, общим для большинства их является принцип регулирования частоты вращения. Значительное снижение частоты вращения (в некоторых схемах в 30—50 раз) достигается использованием метода наложения тормозного момента на двигательный. Такой совмещенный режим может быть получен либо электромагнитным путем благодаря подмагничиванию двигателя постоянным током при совместном питании статора переменным и постоянным током, либо благодаря созданию внешнего тормозного момента на валу двигателя (двухдвигательный электропривод, схема с вихревым тормозным генератором и др.).

Плохие энергетические показатели многих схем (низкие КПД, $\cos \phi$, повышенный нагрев) в схемах точной остановки не играют роли, так как работа механизма на низкой скорости является кратковременной.

В последние годы все большее распространение получают схемы регулирования асинхронных двигателей с использованием тиристорных коммутаторов. Рассмотрению этих схем, дающих пониженные частоты вращения до 5—10% номинальной, мы уделим внимание. Будет также дана краткая характеристика некоторых специальных схем и способов точной остановки электроприводов.

Двухдвигательный электропривод. Низкая скорость перемещения механизма легко может быть получена, если он приводится двумя двигателями (с фазными или короткозамкнутыми роторами). Каждая машина может быть выбрана на 50—70% общей потребной мощности.

Нормально оба двигателя $D1$ и $D2$ работают на общую нагрузку (рис. 16, а), включены контакторы $Л1$ и $Л2$. Механическая характеристика приведена на рис. 16, б (кривая 1). Для замедления электропривода перед остановкой двигатель $D2$ переводится в режим динамического торможения (характеристика 2 на рис. 16, б). С этой целью он отключается от сети, а в две фазы статора подается постоянный ток (включается контактор $Д$). Сила постоянного тока регулируется добавочным резистором R_T .

Результирующая характеристика привода 3 является суммой характеристик 1 и 2 и лежит в области низких частот вращения. Построение одной из точек результирующей характеристики (точка 4') показано на рис. 16, б. При любой выбранной частоте вращения складывают двигательный и тормозной моменты с учетом их знака (из от-

резка $1'-2'$ вычитается отрезок $2'-3'$ и получается точка 4' характеристики 3).

При отсутствии достаточно мощного источника постоянного тока для динамического торможения можно двигатель $D2$ заменить машиной постоянного тока, работающей в режиме динамического торможения на сопротивление в цепи якоря. Это сопротивление выбирается из условия ограничения тока в якоре машины значением не более 200—250% номинального.

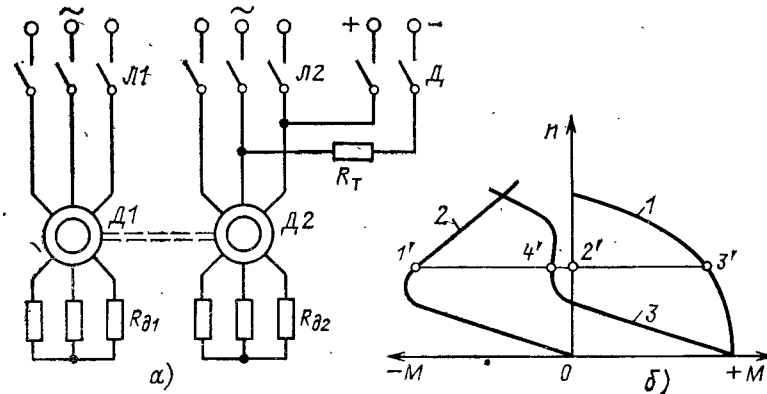


Рис. 16. Получение пониженной частоты вращения двухдвигательного асинхронного электропривода:

а — схема; б — механические характеристики

Для создания тормозного момента на валу двигателя с целью снижения его частоты вращения до 10—20% номинальной перед точной остановкой иногда используется вихревой тормозной генератор. Тормозный момент на валу такого генератора создается за счет взаимодействия постоянного магнитного поля с полем вихревых токов, наводимых в стержнях и теле ротора. Привод с вихревым тормозным генератором получил применение в отечественной и зарубежной промышленности в основном для кранов и используется для точной и безопасной установки поднимаемых грузов.

Совместное питание статора переменным и постоянным током. Известно большое число схем получения пониженной частоты вращения методом наложения постоянного тока на переменный в статоре асинхронного двигателя (короткозамкнутого или с фазным ротором). Для создания постоянной составляющей тока проще всего использовать полупроводниковые выпрямители. На рис. 17, а приведена простейшая схема, обеспечивающая получение пониженной

частоты вращения (несколько процентов синхронной частоты вращения).

Двигатель D при нормальной работе питается от сети переменного тока через контакты контактора L и одного из реверсивных контакторов B или H . Двигатель работает на естественной характеристике 1 (рис. 17,б) и при статическом моменте нагрузки M_c имеет высокую частоту вращения n_p (точка A).

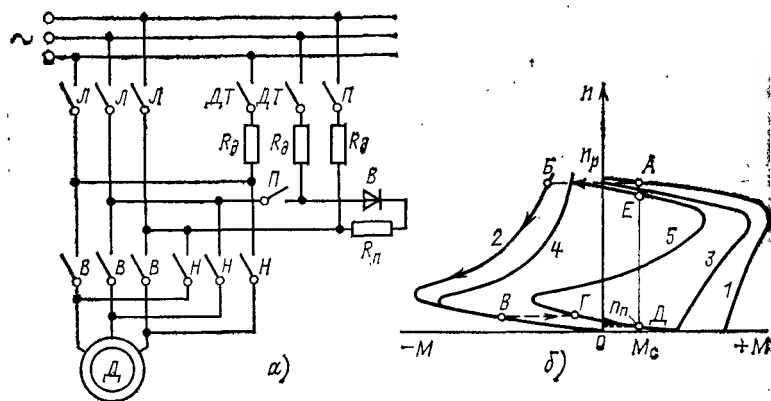


Рис. 17. Совместное питание статора переменным и постоянным током: а — схема; б — механические характеристики

Перед точной остановкой для перехода на пониженную частоту вращения по команде датчика положения отключается контактор L и включается контактор $ДТ$. В две последовательно включенные фазы статора подается выпрямленный ток через вентиль B . В этом режиме происходит динамическое торможение двигателя по характеристике 2. Как показано стрелками, двигатель переходит из точки A в точку B и далее тормозится до точки B . В этот момент срабатывает реле времени, включающее дополнительно к контактору $ДТ$ контактор $П$. Двигатель получает питание трехфазным током через добавочные резисторы R_d . Благодаря включению на линейное напряжение выпрямителя B последовательно с реостатом R_n в фазах статора наряду с переменным током протекает постоянный ток, точнее говоря, ток имеет переменную и постоянную составляющие, так как в проводящий полупериод на добавочных резисторах в статоре происходит падение напряжения и ток в статоре уменьшается. Постоянная составляющая тока создает момент динамического торможения

(характеристика динамического торможения 4), который накладывается на двигательный момент характеристики 3. В результате совмещения двух режимов двигатель работает на характеристике 5, являющейся суммой характеристик 3 и 4.

После переключения двигатель из точки B переходит в точку $Г$ и далее под действием статического момента нагрузки M_c замедляется до частоты вращения n_n (точка $Д$).

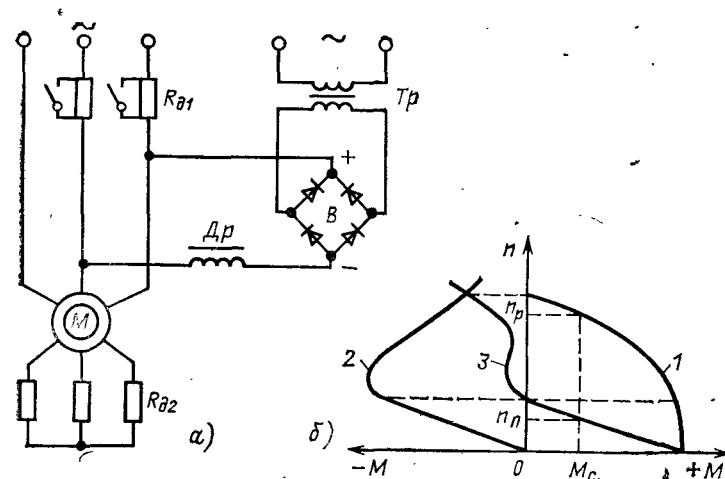


Рис. 18. Применение отдельного выпрямителя для подачи в статор постоянного тока: а — схема; б — механические характеристики

Как видно из графика рис. 17,б, пониженная частота вращения составляет несколько процентов номинальной и является достаточно устойчивой. Следует помнить, что при работе в таком режиме ток двигателя близок к пусковому, т. е. в несколько раз превышает номинальный. Поэтому допустима лишь кратковременная работа на пониженной частоте вращения. Резисторы R_d служат также и для ограничения тока при работе на характеристиках 5 и 2. Реостат R_n позволяет регулировать постоянную составляющую тока.

Выпрямитель D выполняется на кремниевых или селеновых вентилях. Количество диодов выбирается из условия допустимого обратного напряжения и тока нагрузки. Пример расчета и выбора выпрямителя приведен ниже.

Предварительное снижение частоты вращения (в режиме динамического торможения или при выбеге под дей-

ствием статического момента) необходимо, чтобы избежать работы двигателя на второй ветви регулировочной характеристики (рис. 17, б, точка E).

Применение короткозамкнутого двигателя с ювышенным скольжением (например, типа 4АС) или двигателя с фазным ротором позволяет получить более благоприятную результирующую характеристику, которая в области высоких частот вращения лежит целиком во II квадранте (рис. 18, б). В этом случае возможно прямое переключение на результирующую характеристику без предварительного замедления.

Максимальный момент двигателя при пониженной частоте вращения не превышает $1,2M_{ном}$, поэтому рекомендуется применение двигателей с повышенным пусковым моментом и повышенным скольжением. КПД электропривода при работе на пониженной частоте вращения низок. Длительность работы в режиме совместного питания не должна превышать 15 с.

Основная область применения — электроприводы механизмов, требующих кратковременного снижения скорости перед остановкой и работающих с небольшим числом циклов в час.

Схемы совместного питания статора двигателя постоянным и переменным током целесообразно использовать для двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью не более 10 кВт. Для более мощных приводов следует применять асинхронные двигатели с фазным ротором и использовать отдельный источник постоянного тока (рис. 18, а). Резисторы $R_{дл}$ необходимы для ограничения утечек постоянного тока в сеть переменного тока. Дроссель Dp уменьшает пульсации переменного тока в цепи выпрямителя B . При использовании двигателей с фазным ротором результирующая характеристика (рис. 18, б) получается менее жесткой, чем в схемах с короткозамкнутыми двигателями.

Общим недостатком простых схем, приведенных на рис. 17 и 18, является вибрация ротора при низкой частоте вращения, сопровождающаяся шумом. Вибрация нежелательна при наличии зубчатых передач. Основной причиной возникновения вибраций ротора является наличие в двигателе несимметричного магнитного потока. Для ликвидации вибраций при работе на низкой частоте вращения необходимо создать в машине круговое вращающееся магнитное поле и иметь постоянный магнитный поток, равномерно распределенный по окружности статора.

Рассмотрим практически применяемые безвибрационные схемы получения низкой частоты вращения. Для исключения вибраций при низких частотах вращения необходимо обеспечить равенство переменных составляющих токов, создающих круговое вращающееся магнитное поле, а также одинаковый по значению и направлению постоян-

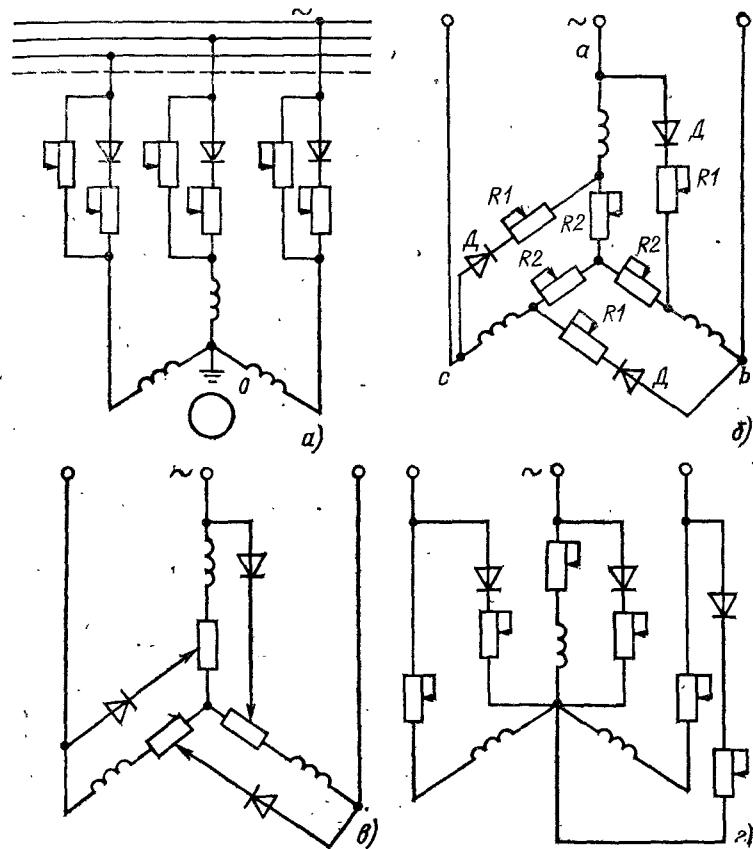


Рис. 19. Симметричные схемы совместного питания статора переменным и постоянным током

ный ток во всех трех фазах статора. Разработан ряд симметричных безвибрационных схем, обеспечивающих выполнение указанных требований [6].

Симметричные схемы совместного питания обмоток статора переменным и постоянным током делятся на схемы с подпиткой сети постоянным током и без подпитки. При-

мер схемы первого рода приведен на рис. 19,а. Подпитка сети постоянным током является недостатком, так как может приводить к нечеткой работе аппаратуры. Преимуществом данной схемы является гибкость регулирования.

Рекомендуемые симметричные схемы без подпитки сети постоянным током показаны на рис. 19,б, в, г. В этих схемах постоянные составляющие токов замыкаются в контурах схемы. Рассмотрим подробнее схему, изображенную на рис. 19,б. Между началами обмоток фаз а, б, с, и концами обмоток фаз б, с, а включены выпрямители Д последовательно с регулировочными резисторами R1. Последовательно с каждой фазной обмоткой статора включены резисторы R2, служащие для регулировки переменного тока. В каждой фазе статора наряду с переменным протекает постоянный ток. Значение этого тока регулируется резисторами R1. Так как выпрямители Д одинаково направлены и образуют треугольник, в линейных проводах постоянные токи взаимно уничтожаются. При наладке в линейные провода включают амперметры постоянного тока с нулем в середине шкалы. При полной симметрии все амперметры показывают нуль.

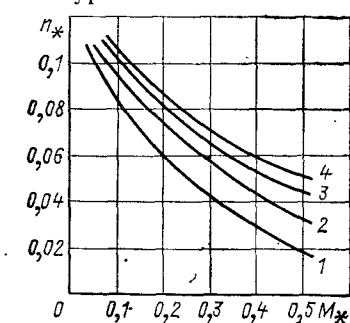


Рис. 20. Механические характеристики симметричной схемы понижения частоты вращения:

1 — $R1=0$, $R2=10R_{\phi}$; 2 — $R1=2R_{\phi}$, $R2=5R_{\phi}$; 3 — $R1=5R_{\phi}$, $R2=2R_{\phi}$; 4 — $R1=10R_{\phi}$, $R2=0$; R_{ϕ} — сопротивление фазы статора

Механические характеристики (рис. 20) в области низких частот вращения являются достаточно жесткими. Характеристики построены для различных значений сопротивления резисторов R1 и R2. Из характеристик видно, что с увеличением постоянного тока (уменьшением R1) частота вращения двигателя уменьшается. В качестве выпрямителей Д могут быть использованы различного типа полупроводниковые диоды.

Краткие сведения о полупроводниковых выпрямителях. Наиболее широко в промышленности распространены кремниевые и селеновые выпрямители. Выпускаются силовые кремниевые диоды с естественным охлаждением серий В, ВЛ, В2, В10, В14, ДЛ и др. на токи 10—1600 А и обратные напряжения 100—1600 В.

Для защиты кремниевых диодов от перенапряжений каждый из них обычно шунтируют RC-цепочкой. Так, например, диоды В200 шунтируют последовательно соединенными резистором 30 Ом и конденсатором емкостью 2 мкФ. В случае последовательного соединения двух диодов и более каждый из них рекомендуется шунтировать резистором для равномерного распределения обратного напряжения. Сопротивление шунтирующего резистора рассчитывается по формуле

$$R_{ш} \leq \frac{nU_{b,max} - 1,1U_{max}}{(n-1)I_{b,max}}, \quad (16)$$

где $U_{b,max}$ и $I_{b,max}$ — максимальные значения обратного напряжения и тока диода; n — число диодов в цепи; U_{max} — максимальное обратное напряжение, прикладываемое к вентильной цепи.

Сопротивление резистора $R_{ш}$ выбирается таким, чтобы ток в нем был примерно равен двукратному значению обратного тока диода.

В схемах получения низкой частоты вращения асинхронных двигателей малой мощности можно использовать селеновые вентили. Селеновые вентили на стальной основе допускают максимальное амплитудное значение обратного напряжения на одном вентиле 20—25 В, а на алюминиевой основе 30—35 В. Среднее значение длительно допустимого тока на один вентиль:

Размер вентиль, мм	Ток А	Размер вентиль, мм	Ток А
Ø35.	0,15	75×75	1,2
Ø45	0,3	90×90	1,5
Ø60	0,6	100×100	2,0
Ø75	1,2	100×200	4,0
Ø100	1,5	100×300	6,0
40×40	0,3	100×400	8,0
60×60	0,6		

Допустима кратковременная перегрузка токами, в несколько раз превышающими указанные токи длительного режима.

Значительно реже в электроприводе применяют германиевые вентили: германиевые диоды типов Д302—Д305 на токи 1, 3, 5 и 10 А и обратные напряжения соответственно 200, 150, 100 и 50 В и мощные германиевые вентили с водяным охлаждением типов ВГВ-200, ВГВ-500 и ВГВ-1000 на токи 200—1000 А и обратные напряжения до 100 В.

Пример 3. Рассмотрим упрощенную методику расчета и выбора резисторов и выпрямителей для безвибрационной схемы получения низкой частоты вращения по рис. 19,б.

Для примера выберем электродвигатель 4А80А4; его номинальная мощность $P_{ном}=1,1$ кВт, напряжение $U_{ном}=380$ В, частота вращения $n_{ном}=1420$ об/мин, номинальный ток $I_{ном}=2,76$ А, пусковой ток $I_k=5I_{ном}=13,8$ А.

Сопротивление R , равное сумме сопротивлений резисторов R_1 и R_2 , находится по формуле

$$R = 0,22 \frac{U_{ном}}{I_{ном}} = 0,22 \frac{380}{2,76} = 30,3 \text{ Ом.}$$

Выбор ящика резисторов производится по длительному току, эквивалентному по перегреву кратковременному току I_n , протекающему через резисторы [7].

Примем, что время работы при «ползучей» частоте вращения равно 10 с, а при нормальной работе с высокой частотой вращения резисторы током не обтекаются. Ток I_n можно считать равным пусковому току: $I_n = I_k = 13,8$ А.

По таблице резисторов [7, табл. 5-10] находим среднюю постоянную времени T ящика резисторов предполагаемого типа: $T=175$ с. Далее по отношению времени включения к постоянной времени $t_p/T = 10/175 = 0,057$ находим по кривой $I_{эп}/I_p = t(t_p/T)$ [7, рис. 5-6] отношение эквивалентного по перегреву тока $I_{эп}$ к рабочему току I_p , равному в нашем случае $I_p = I_k = 13,8$ А, $I_{эп}/I_p = 0,23$.

Эквивалентный ток равен $I_{эп} = 0,23 \cdot 13,8 = 3,18$ А.

По этому току и требуемому сопротивлению $R=30,3$ Ом выбирается блок (ящик) резисторов ЯС100/2 или ЯС3 с 11 элементами по 12 Ом, 5,4 А. Для каждой фазы используется по 3 элемента. Соотношение между резисторами $R1$ и $R2$ устанавливается при наладке; можно при этом руководствоваться данными, приведенными на рис. 20. В качестве выпрямителей D можно применить кремниевые диоды В(ВЛ)25, 25 А, 500 В.

В случае применения селеновых выпрямителей необходимо найти число последовательно и параллельно включенных шайб. Примем допустимую кратность перегрузки селенового выпрямителя при работе в течение 10 с $K_I=5$.

Расчетное значение тока

$$I_{расч} = \frac{I_k}{2K_I} = \frac{13,8}{2 \cdot 5} = 1,38 \text{ А.}$$

Выбираем селеновые шайбы диаметром 100 мм на ток 1,5 А. Число последовательно соединенных шайб в каждой фазе

$$n = 1,2 \frac{\sqrt{2}U_n}{U_{доп}} = 1,2 \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{25} = 26,$$

Рис. 21. Схема электрической фиксации

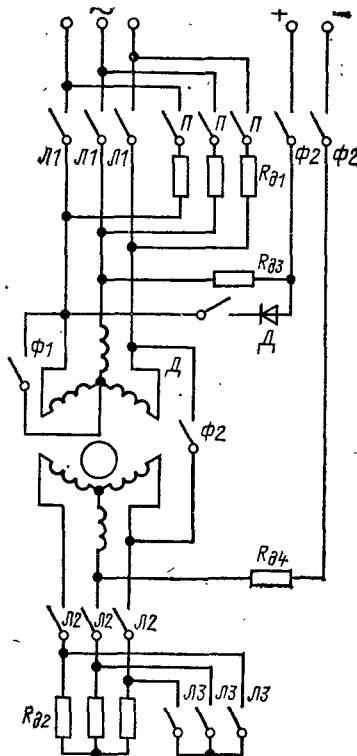
где U_n — линейное напряжение; $U_{доп}=25$ В — амплитуда допустимого обратного напряжения на шайбу; 1,2 — коэффициент запаса.

Схема с фиксацией постоянным током. Схема электрической фиксации путем подачи постоянного тока в статорную и роторную обмотки позволяет получить высокую точность остановки без необходимости большого предварительного снижения частоты вращения, что связано с увеличением постоянной составляющей тока. Значение пониженной частоты вращения перед окончательной остановкой может быть принято равным 20% номинальной.

Схема электрической фиксации показана на рис. 21. При работе механизма на высокой скорости включены контакторы $\Pi 1$, $\Pi 2$ и $\Pi 3$. Перед окончательной остановкой двигатель переводится на пониженную частоту вращения. Контакторы $\Pi 1$ и $\Pi 3$ отключаются, включается контактор Π . В цепи статора и ротора вводятся добавочные резисторы $R_{д1}$ и $R_{д2}$, на линейное напряжение параллельно двум фазам статора включается выпрямитель D . Получается описанная выше схема наложения тормозного момента на двигательный.

При подходе механизма на пониженной скорости к заданному положению по команде конечного выключателя точной остановки отключаются контакторы Π и $\Pi 2$ и включаются контакторы $\Phi 1$ и $\Phi 2$. В последовательно включенные две статорные и две роторные обмотки подается постоянный ток от сети или вспомогательного полупроводникового выпрямителя. Сила постоянного тока выбирается примерно равной номинальному току статора $I_{ном}$ и регулируется с помощью резисторов $R_{д3}$ и $R_{д4}$.

Под действием образовавшегося постоянного магнитного поля полюсы ротора притягиваются к соответствующим



полюсам статора, и ротор останавливается в строго фиксированном положении. Контакт $\Phi 1$ закорачивает третью свободную фазу статорной обмотки, служащую демпфером для исключения колебаний ротора около положения точной остановки. После окончания фиксации контакторы $\Phi 1$ и $\Phi 2$ отключаются.

Таблица 2. Сравнение наиболее употребительных многоскоростных асинхронных двигателей

Серия двигателя	Отношение чисел полюсов p_n/p_v	Синхронные частоты вращения, об/мин	Максимальная мощность при высокой частоте вращения, кВт
4А	12/6	500/1000	110
	8/4	750/1500	200
	8/6/4	750/1000/1500	37
	8/4/2	750/1500/3000	9,5
	12/8/6/4	500/750/1000/1500	30
МТКН	12/6	500/1000	2,2
	16/6	375/1000	11
	20/6	300/1000	22
МТКФ	12/4	500/1500	4
	24/4	250/1500	22
	24/2	250/3000	15
	24/8/4	250/750/1500	45
Т	16/2	375/3000	4,5
	16/4	375/1500	5
	12/6/4/2	500/1000/1500/3000	3,5
ВАО	18/6	333/1000	71,5
АВТ	12/6/4	500/1000/1500	22

Подмагничивание постоянным током двухскоростного асинхронного двигателя. Многоскоростные асинхронные двигатели серий АО2, 4А, МТКН, МТКФ, ВАО, Т широко применяются в промышленности для получения низкой рабочей скорости механизма и для предварительного его замедления с целью повышения точности остановки. В табл. 2 приведены значения максимальных мощностей двигателей и отношений чисел полюсов обмоток статора p_n/p_v при работе на низкой и высокой частотах вращения. Из таблицы видно, что у серийных двигателей мощностью более 15 кВт путем переключения обмоток статора нельзя получить низ-

кую частоту вращения (менее 15% высокой частоты вращения).

Когда для повышения точности остановки необходима более низкая частота вращения (2—3%), можно использовать метод совмещения двигательного и тормозного режимов в электрической машине. С этой целью в одну обмотку статора (обмотку высокой частоты вращения) подается постоянный ток от сети или индивидуального выпрямителя для создания тормозного момента, соответствующего режиму динамического торможения. Вторая обмотка включается в сеть переменного тока.

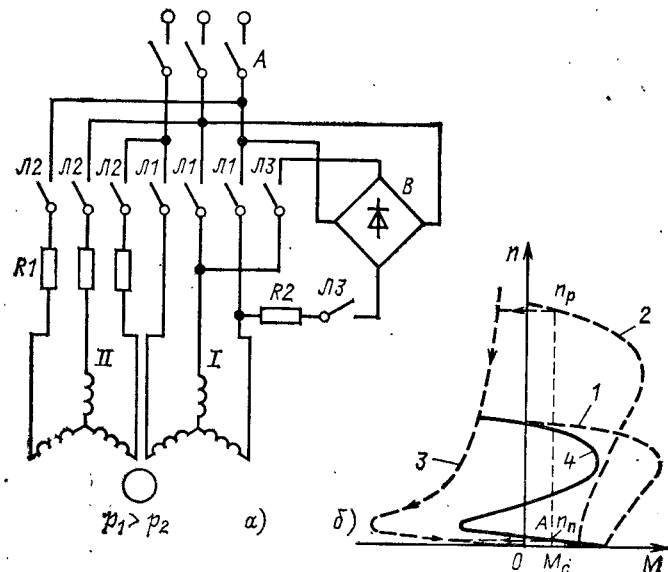


Рис. 22. Получение «ползучей» частоты вращения многоскоростного асинхронного двигателя:

а — схема; б — механические характеристики

На рис. 22,а приведена схема включения двухскоростного двигателя для получения «ползучей» частоты вращения, а на рис. 22,б показаны механические характеристики двигателя для различных способов его включения. Во время рабочего хода при высокой частоте вращения включен контактор $\text{Л}1$, подключающий к сети переменного тока обмотку I (с меньшим числом полюсов). Двигатель работает на характеристике 2. При моменте нагрузки M_c частота вращения равна n_p . Для замедления электропривода отключается контактор $\text{Л}1$ и включается контактор $\text{Л}3$.

В последовательно включенные обмотки двух фаз статора подается постоянный ток от выпрямителя B , и двигатель переходит в режим динамического торможения по характеристике 3 (как показано стрелками). Постоянный ток должен быть приблизительно равен трехкратному току холостого хода включаемой обмотки. Резистор $R2$ служит для получения требуемого значения постоянного тока.

В конце торможения включается контактор $L2$. При этом дополнительно к работающей обмотке I на сеть включается обмотка II . Происходит наложение двигательного и тормозного режимов, в результате чего двигатель переходит на характеристику «ползучей» частоты вращения 4, являющуюся суммой характеристики двигательного режима при низкой частоте вращения 1 и тормозной характеристики 3. При моменте M_c ротор двигателя вращается с частотой вращения n_n .

Построение этой результирующей характеристики легко выполняется путем сложения с учетом знака моментов на характеристиках 1 и 3 для нескольких значений частоты вращения. Как видно из рис. 22,б, суммарная результирующая характеристика дает стабильную низкую частоту вращения (до 2—3% номинального значения).

Для окончательной остановки двигателя вновь отключается обмотка II и происходит динамическое торможение с «ползучей» частоты вращения до полной остановки (переход из точки A в точку O показан стрелками).

Получаемая в описанной схеме низкая частота вращения обеспечивает высокую точность остановки электропривода. При исследованиях этой схемы на двигателе мощностью 0,75 кВт А. С. Сандлером была получена неточность остановки $\pm 8^\circ$ на валу двигателя при изменении статического момента нагрузки на 50% и колебаниях напряжения питающей сети на $\pm 10\%$.

Как и в других аналогичных схемах совмещения двигательного и тормозного режимов, в короткозамкнутых двигателях при низкой частоте вращения токи близки к пусковым. Добавочные резисторы $R1$ в статоре служат для некоторого снижения тока. Однако одновременное уменьшение пускового и максимального моментов на характеристике 4 может быть нежелательным (при большом моменте нагрузки). Низкая частота вращения должна использоваться кратковременно.

Тиристорные схемы получения пониженных частот вращения асинхронных двигателей. Тиристоры в схемах совместного питания статора переменным и постоянным током

дают возможность легко настраивать требуемую пониженную частоту вращения, выбирая нужную регулировочную характеристику. Одна из простых и эффективных схем показана на рис. 23,а. В цепях двух фаз статора включены встречно-параллельно по одному тиристор и диоду. Изменяя угол открывания тиристоров α , регулируют соотношение между переменной и постоянной составляющими напряжения.

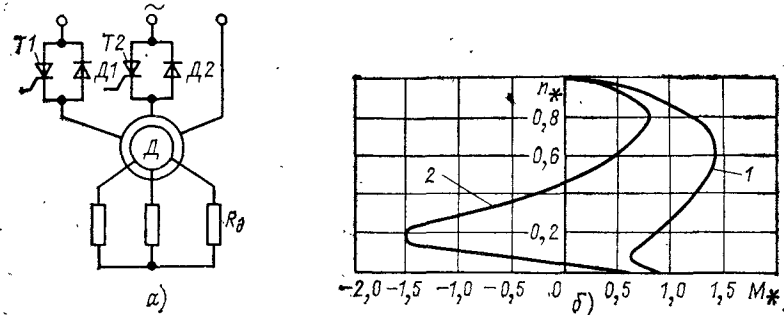


Рис. 23. Несимметричная схема включения в цепь статора тиристоров и диодов (а) и механические характеристики (б) при $R_p = 0,1R_n$: 1 — $\alpha = 80^\circ$; 2 — $\alpha = 120^\circ$

При полностью открытых тиристорах двигатель работает на естественной характеристике. Когда тиристоры закрыты ($\alpha \approx 150^\circ$), наступает режим питания двигателя пульсирующим током, и он переходит в режим динамического торможения. При промежуточных значениях угла α ток статора содержит переменную и постоянную составляющие. При больших углах α (80—120°) двигатель работает с устойчивой низкой частотой вращения (рис. 23,б). Для быстрого перехода с высокой на низкую частоту вращения можно использовать конденсаторное торможение.

Как и во всех подобных схемах совместного питания двигателя переменным и постоянным током, электрические потери в обмотках превышают номинальные в 10—15 раз при использовании двигателей с фазным ротором и в 25 раз и более в электроприводах с короткозамкнутыми двигателями.

Две простейшие симметричные схемы на тиристорах и симисторах приведены на рис. 24. В схеме рис. 24,а тиристоры $T1—T3$ регулируют переменную составляющую тока статора, тиристоры $T4—T6$ — постоянную составляющую. При включении пары тиристоров (например, $T1$ и $T4$) двигатель переводится в режим динамического тормо-

жения. В схеме рис. 24,б переменная составляющая тока регулируется симисторами $C1-C3$, а постоянная составляющая — тиристорами $T1-T3$. Тормозной режим возникает при открытии симистора $C1$ «вверх», а $C2$ «вниз» при одновременном открытии тиристоров $T1$ и $T2$.

Более широкие регулировочные возможности предоставляет схемы с включением асинхронного двигателя через промежуточный трансформатор. Схема с двумя пониженными частотами вращения изображена на рис. 25,а. При

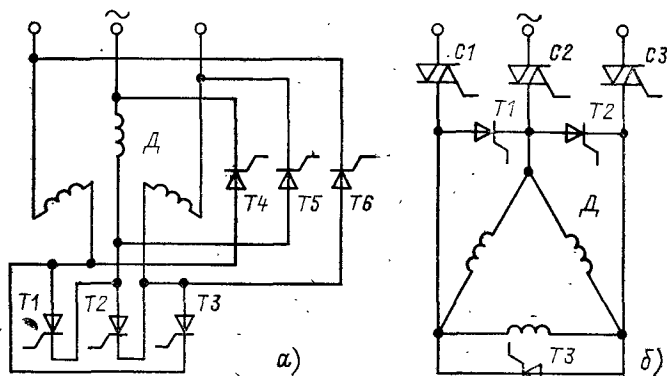


Рис. 24. Симметричные схемы получения «ползучей» частоты вращения асинхронных двигателей:

а — схема на тиристорах; б — схема на симисторах

полностью открытых тиристорах $T1-T3$ двигатель работает на естественной характеристике. После закрывания этих тиристоров и открывания симистора $ТС$ в оба направления к параллельно соединенным обмоткам фаз статора подводится однофазное напряжение. При этом суммарный момент от первой пространственной гармоники магнитного поля равен нулю и вращающий момент создается третьей пространственной гармоникой; синхронная частота вращения двигателя в этом режиме равна $n_{ном}/3$. При переходе с $n_{ном}$ к $n_{ном}/3$ происходит интенсивное рекуперативное торможение. Затем симистор $ТС$ открывают только в прямом направлении, а тиристоры $T1-T3$ открывают не полностью. Происходит наложение постоянного магнитного поля на вращающееся и двигатель переходит на пониженную частоту вращения. Открывание тиристора $T4$ увеличивает вдвое постоянную составляющую тока в статоре и сокращает путь выбега с пониженной частоты вращения при закрывании тиристоров $T1-T3$. Осциллограмма про-

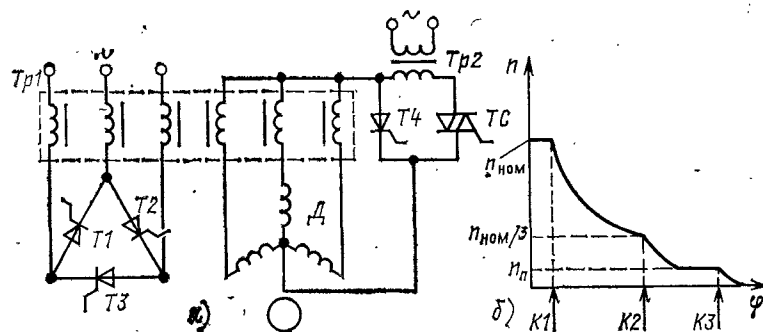


Рис. 25. Формирование трехступенчатого графика замедления с двумя пониженными частотами вращения:

а — схема; б — диаграмма снижения частоты вращения; $K1-K3$ — команды на замедление и остановку

цесса замедления и точной остановки показана на рис. 25,б.

Схемы с тиристорными регуляторами напряжения. С переходом к бесконтактным тиристорным пускателям и тиристорным станциям управления, осуществляющим плавное регулирование напряжения, возможности схем асинхронного позиционного электропривода расширились. При этом удалось упростить схемы силовых цепей за счет контакторов и мощных резисторов, уменьшить потери энергии, сократить время работы на «ползучей» частоте вращения и повысить благодаря этому производительность.

Основные элементы схемы электропривода с трехфазным тиристорным регулятором напряжения (ТРН) представлены на рис. 26,а. Обратная связь по частоте вращения с использованием тахогенератора $ТГ$ обеспечивает жесткие механические характеристики (рис. 26,б). С ростом момента нагрузки на валу частота вращения начинает снижаться, однако уменьшение напряжения тахогенерато-

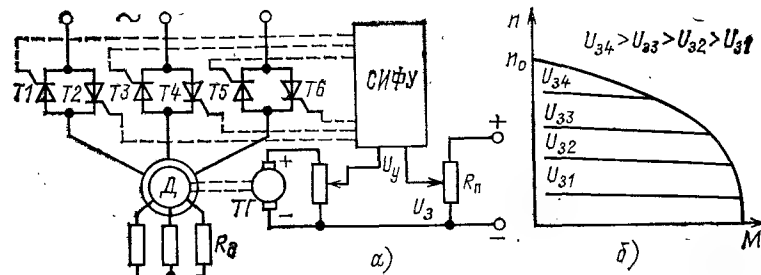


Рис. 26. Схема с тиристорным регулятором напряжения и обратной связью по частоте вращения (а) и механические характеристики (б)

ра приводит к росту напряжения на входе СИФУ. В результате угол открывания тиристоров α уменьшается, напряжение на статоре увеличивается, поддерживая частоту вращения двигателя на уровне, близком к первоначальному. Изменяя потенциометром R_n задающее напряжение U_3 , получают семейство механических характеристик (рис. 26,б). Диапазон регулирования может достигать 1:10 и более.

Для бесконтактного реверса используют схему, содержащую 10 тиристоров (рис. 27). Эта схема позволяет легко получить режим динамического торможения путем открывания четырех из десяти тиристоров. Так, например, открыв тиристоры $T1, T4, T8$ и $T9$, образуют однофазный выпрямительный мост, питающий последовательно соединенные обмотки фаз А и В статора [8].

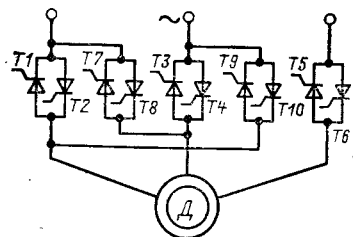


Рис. 27. Реверсивная схема управления двигателем с тиристорным регулятором напряжения

Схемы с ТРН применяют для плавного регулирования частоты вращения как двигателей с фазным ротором, так и короткозамкнутых. С использованием описанных принципов ТРН промышленность серийно выпускает тиристорные станции управления ТСУР и ТСУ-РП для двигателей мощностью до 75 кВт. Функциональная схема станции ТСУР показана на рис. 28. Станция ТСУР осуществляет плавный пуск двигателя с ограничением ударных динамических моментов в механизме, реверс, регулирование частоты вращения в диапазоне 1:10 при использовании обратной связи от тахогенератора, динамическое торможение регулируемой интенсивности, форсированный переход на пониженную частоту вращения в режиме динамического торможения. Падение частоты вращения при изменении момента на валу двигателя от 0 до $M_{ном}$ не превышает 10%.

Схемой тиристорной станции ТСУР предусмотрены все необходимые виды защит асинхронного двигателя и тиристорного коммутатора: от коротких замыканий, перегрузки, снижения напряжения сети, обрыва фазы, нулевая защита, а также токовая отсечка по току статора. Габариты станции ТСУР на ток 63 А равны 700×600×1400 мм, на ток 100 А — 700×600×1800 мм.

Упрощенным вариантом схем с ТРН является асинхронный электропривод с регулированием степени несимметрии подводимого напряжения (рис. 29,а). Схема содержит всего два тиристора. При малых углах открывания тиристоров α к двигателю прикладывается симметричное

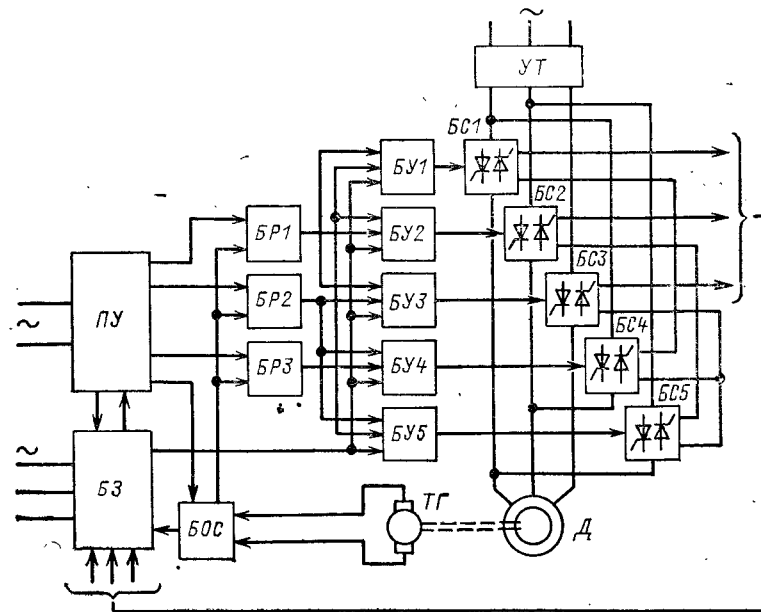


Рис. 28. Асинхронный электропривод с фазовым управлением тиристорным коммутатором в цепи статора с применением станции ТСУР:
Д — двигатель; ТГ — тахогенератор; БС1—БС5 — силовые тиристорные блоки; УТ — узел токоограничения; БУ1—БУ5 — блоки фазового управления; БР1—БР3 — блоки режима; БОС — блок обратной связи; БЗ — блок защиты; ПУ — панель управления

напряжение. Изменяя угол открывания тиристоров, можно получить различную степень несимметрии трехфазного напряжения вплоть до отключения одной фазы двигателя. При промежуточном значении угла α в каждом полупериоде через определенный промежуток времени к сети подключается третья фаза и двигатель переводится из несимметричного режима в симметричный [9]. Механические характеристики 1—5 показаны на рис. 29,б. Диапазон регулирования в замкнутой системе (характеристика 1) равен 1:5—1:10.

Конденсатор С, включенный на зажимы двух фаз статора, позволяет осуществить электрическое торможение и расширить пределы изменения момента на валу двигателя.

Торможение осуществляется по переходной характеристике Π (рис. 29,б).

Емкость конденсатора, мкФ,

$$C = 2130 / Z_{\Phi},$$

где Z_{Φ} — полное сопротивление фазы статора, Ом.

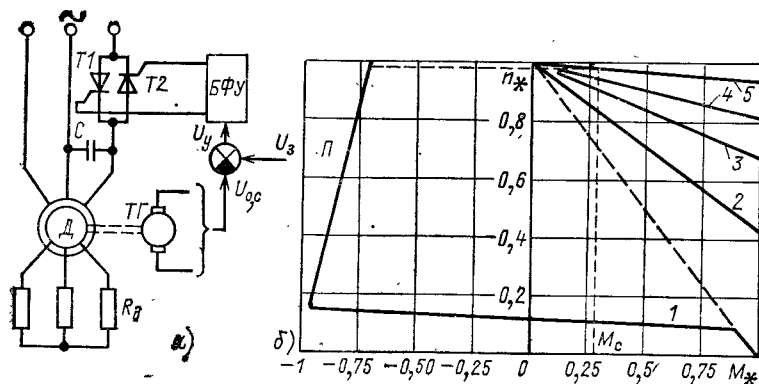


Рис. 29. Схема асинхронного электропривода с регулируемой степенью несимметрии напряжения (а) и механические характеристики (б)

Питание двигателя током низкой частоты. Одним из способов получения пониженной частоты вращения асинхронного двигателя является питание током низкой частоты. Как известно, синхронная частота вращения n_0 прямо пропорциональна частоте тока:

$$n_0 = \frac{60f}{p},$$

где f — частота; p — число пар полюсов.

Для получения низкой частоты тока используют тиристорные или электромашинные преобразователи. Применение таких преобразователей для получения точной остановки электроприводов является экономически оправданным лишь в тех случаях, когда имеется много механизмов, скорость которых необходимо снижать для точной остановки или по другим технологическим требованиям. Самым простым и дешевым является асинхронный двухмашинный преобразователь частоты, состоящий из приводного короткозамкнутого двигателя и трехфазной электрической машины с фазным ротором. Такой преобразователь нетрудно собрать в любом цехе.

На рис. 30,а показана схема асинхронного преобразователя частоты. Приводной двигатель АД вращает асинхронную машину АПЧ. Напряжение U_2 и частота тока в роторе машины АПЧ f_2 прямо пропорциональны скольжению s , равному

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0},$$

где n_0 — синхронная частота вращения машины АПЧ, определяемая числом пар полюсов p и частотой сети f_1 ;

n — частота вращения ее ротора;

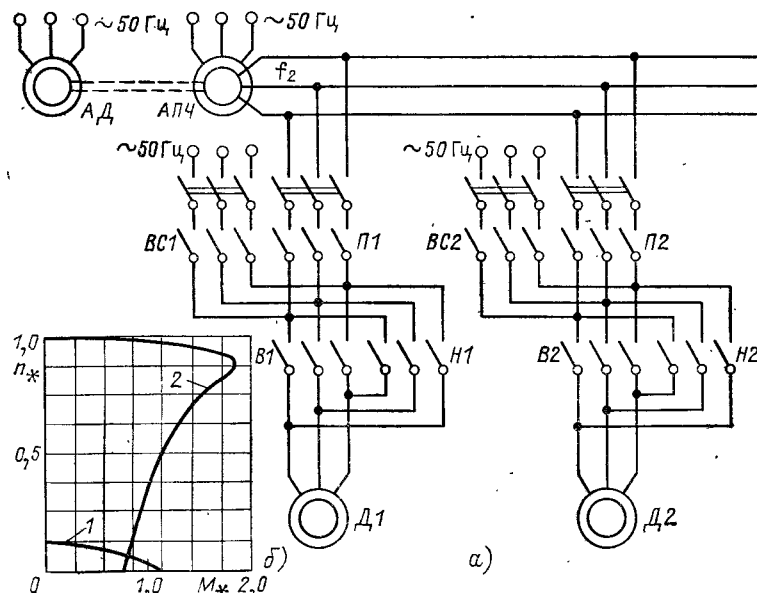


Рис. 30. Использование асинхронного преобразователя частоты: а — схема; б — механические характеристики

$$U_2 = E_{2k} s = \frac{E_{2k}(n_0 - n)}{n_0};$$

$$f_2 = f_1 s = \frac{f_1(n_0 - n)}{n_0};$$

здесь E_{2k} — напряжение на кольцах при неподвижном роторе.

Если выбрать шестиполюсную машину АПЧ ($n_0 = 1000$ об/мин), а приводной двигатель АД взять вось-

мипольный ($n \approx 730$ об/мин), то частота тока в роторе АПЧ будет равна

$$f_2 = \frac{f_1(1000 - 730)}{1000} = 0,27f_1.$$

Более низкую частоту тока можно получить, используя восьмипольный преобразователь АПЧ и десятипольный приводной двигатель. В этом случае

$$f_2 = \frac{f_1(750 - 570)}{750} = 0,24f_1.$$

Для перевода на пониженную частоту вращения рабочие двигатели Д1, Д2 и т. д. отключаются от сети и подключаются к ротору АПЧ (рис. 30,а). Для переключения служат контакторы высокой частоты вращения ВС1, ВС2 ... и пониженной частоты вращения П1, П2 ...

Таким образом, снижение частоты вращения двигателей в 4 раза легко осуществимо при использовании стандартных электрических машин. Механическая характеристика двигателя при питании током низкой частоты приведена на рис. 30,б (кривая 1). Там же для сравнения показана естественная характеристика 2. Характеристика низкой частоты вращения является жесткой, что необходимо для получения стабильной пониженной скорости механизма. Пусковой момент двигателя падает с уменьшением частоты тока. Для увеличения пускового момента достаточно применить повышающий трансформатор в цепи ротора АПЧ.

Мощность, снимаемая с колец АПЧ, пропорциональна частоте тока. Это позволяет выбирать приводной двигатель преобразователя меньшей установленной мощности; при специальном изготовлении мощность преобразователя АПЧ также уменьшается. Так, например, на некоторых зарубежных кранах используют одноякорные преобразователи, дающие частоту 6 Гц для получения точной остановки при опускании грузов. Мощность преобразователя составляет 25% мощности двигателя крана.

В отличие от рассмотренных выше схем наложения тормозного момента на двигательный для получения низкой частоты вращения питание током низкой частоты не приводит к большим токам и перегреву двигателей даже при продолжительной работе механизма на низкой скорости. Это является большим достоинством описанного способа регулирования.

При включении машин АД и АПЧ в сеть необходимо следить, чтобы направления вращения ротора АД и ма-

гнитного поля АПЧ совпадали. В противном случае вместо снижения частоты тока можно ошибочно получить частоту в 1,5—2 раза выше нормальной.

В настоящее время промышленность выпускает тиристорные преобразователи частоты серий ЭКТ, ЭКТР на частоты 1—90 Гц и токи 20—160 А, ПЧШ и ПЧР с частотами 2—70 Гц на токи 200—800 А, ПЧНС с частотами 5—25 Гц, 800 А и др. Тиристорные преобразователи частоты применяют в новых и реконструируемых цехах при наличии соответствующих технико-экономических обоснований.

Импульсное регулирование частоты вращения. При импульсном регулировании напряжение на двигатель подается короткими импульсами, перемежающимися паузами. На рис. 31,а приведены графики изменения напряжения на двигателе U и частоты его вращения n в функции вре-

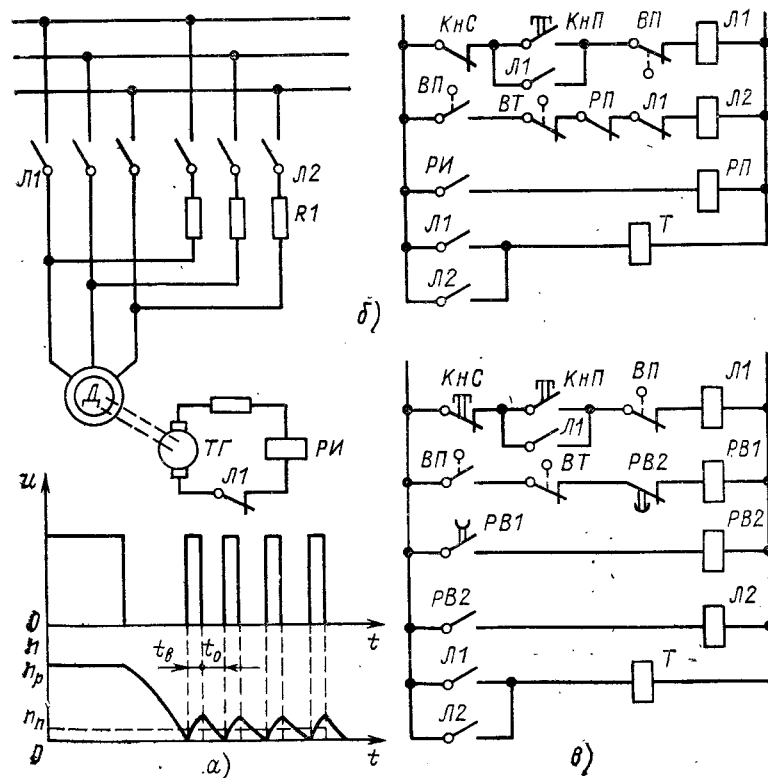


Рис. 31. Импульсное регулирование частоты вращения:

а — графики изменения напряжения U и частоты вращения n ; б — схема с тахогенератором; в — схема с пульс-парой

мени. За время включения $t_{\text{в}}$ частота вращения двигателя не успевает значительно увеличиться, а за время паузы t_0 двигатель замедляется до остановки. Благодаря такому импульсному управлению можно получить достаточно низкую среднюю частоту вращения. С увеличением частоты импульсов колебания частоты вращения уменьшаются. Изменяя соотношение $t_{\text{в}}$ и t_0 , можно подобрать требуемую по условиям точной остановки частоту вращения $n_{\text{п}}$.

На рис. 31,б показана одна из простейших схем импульсного управления. Двигатель D длительно работает при частоте вращения $n_{\text{р}}$; при этом включен контактор $L1$. По команде конечного выключателя $ВП$ начинается процесс замедления. Двигатель отключается и затормаживается тормозом T . Размыкающий контакт $L1$ включает на зажимы тахогенератора $TГ$ быстродействующее слаботочное реле $РИ$. При частоте вращения двигателя, близкой к нулю, реле $РИ$ отпадает и разрывает цепь промежуточного реле $РП$. Включается контактор $L2$, и двигатель начинает увеличивать частоту вращения. Когда напряжение на тахогенераторе возрастет, вновь включится реле $РИ$, контактор $L2$ отключится и двигатель начнет затормаживаться. Импульсные включения и отключения двигателя, дающие среднюю «ползучую» частоту вращения, будут продолжаться до тех пор, пока не сработает выключатель точной остановки $ВТ$, отключающий контактор $L2$. Накладывается тормоз, и механизм останавливается в заданном положении. Резисторы $R1$ в цепи статора служат для снижения пусковых токов и повышения плавности пуска двигателя. Цепь реверса двигателя условно не показана.

На рис. 31,в приведен другой вариант описанной схемы, отличающийся отсутствием тахогенератора. Для импульсного управления служит пульс-пара, собранная на двух реле времени $PВ1$ и $PВ2$.

Крупным недостатком релейно-контакторных схем импульсного управления является большое число включений аппаратуры. Поэтому в последние годы получают распространение схемы импульсного регулирования частоты вращения двигателей с тиристорными коммутаторами. Так, в схеме с тиристорным регулятором напряжения в цепи статора (рис. 26) можно, периодически открывая и закрывая тиристоры, создавать режим импульсного регулирования, аналогичный рассмотренному выше. Уменьшая продолжительность открытого состояния тириستоров, снижают среднюю частоту вращения двигателя. Для получения жестких механических характеристик используют си-

стему автоматического регулирования с обратной связью по частоте вращения.

Большие возможности импульсного регулирования открываются при использовании двигателей с фазным ротором. Схема импульсного регулирования с тиристорным ключом в цепи выпрямленного тока ротора показана на рис. 32,а. К кольцам ротора подключается трехфазный неуправляемый выпрямитель, нагруженный на добавочный резистор $R_{\text{д}}$. Параллельно резистору $R_{\text{д}}$ включен тири-

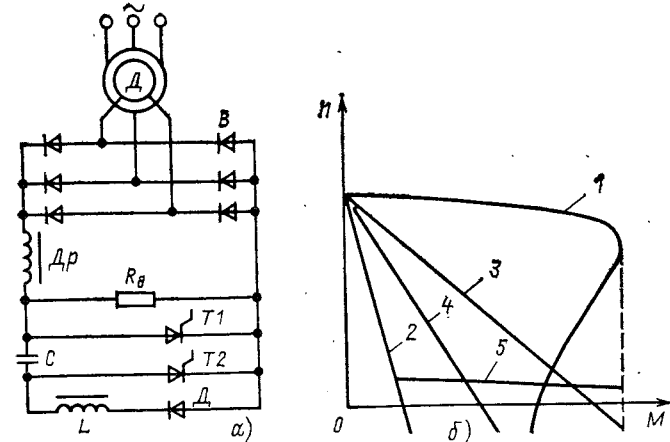


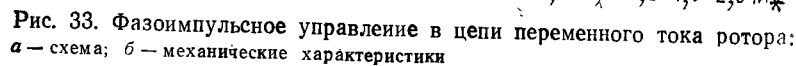
Рис. 32. Импульсное управление сопротивлением в цепи выпрямленного тока ротора:

а — схема; б — механические характеристики

стор $T1$, периодическое открывание и закрывание которого приводит к изменению эквивалентного добавочного сопротивления от 0 до $R_{\text{д}}$. Для сглаживания пульсаций служит дроссель $Др$. Вспомогательный тиристор $T2$, конденсатор C , индуктивность L и диод D образуют узел искусственной коммутации для закрывания основного тиристора $T1$, работающего в цепи постоянного тока. В момент подачи управляющего напряжения на тиристор $T2$ конденсатор C разряжается, создавая отрицательное затухающее напряжение для $T1$. В цепь выпрямленного тока ротора вводится резистор $R_{\text{д}}$, а конденсатор C перезаряжается по цепи $В-T2$.

Механические характеристики при импульсном управлении резистором в цепи ротора показаны на рис. 32,б. Граничные механические характеристики: естественная 1 ($R_{\text{р,экв}}=0$) и искусственная 2 ($R_{\text{р,экв}}=R_{\text{д}}$). Промежуточ-

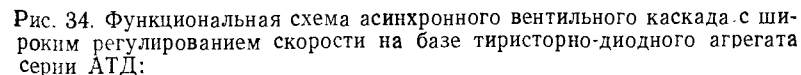
Известен ряд схем импульсного регулирования с включением тиристоров в цепь переменного тока ротора. Простейшая система электропривода этого класса представле-



Система электропривода по рис. 33,а имеет жесткие механические характеристики в зоне низких частот вращения (рис. 33,б). Сплошными линиями показаны характеристики, соответствующие $R_{*}=0,5$, пунктирными линиями — характеристики при $R_{*}=0,25$.

56

Функциональная схема асинхронного вентильного каскада, выполненного с применением тиристорно-диодного агрегата АТД, показана на рис. 34. Регулирование частоты вращения двигателя осуществляется путем введения в цепь выпрямленного напряжения ротора противо-ЭДС инвертора, значение которой плавно регулируется. В замкнутой системе регулирования возможно применение обратной связи как по частоте вращения, так и по ЭДС ротора. Энергия скольжения передается в сеть, и КПД электро-



Д — двигатель; В — выпрямитель; И — инвертор; Др — сглаживающий дроссель; ТОР — токоограничивающий реактор; СИФУ — система импульсно-фазового управления; УПН — усилитель полупроводниковых переверсивных; БКТ — блок коррекции и токоограничения; БЗ, БЭС, ВСИП — блоки защиты и снятия импульсов; БТЗ — блок тепловой защиты; ТГ — тахогенератор; ЗС — задатчик скорости; U_a — задающее напряжение; $U_{o.c.}$ — напряжение обратной связи по скорости; БП — блок питания; ТГ1—ТГ5 — трансформаторы тока; А — автоматический выключатель с дистанционным расцепителем ДРА; К — тиристорный коммутатор или контакты реверса

привода составляет не менее 95%. Размеры преобразовательного агрегата привода мощностью 100 кВт относительно невелики ($800 \times 800 \times 2200$ мм). Для реверсирования данного привода используют контакторы (на схеме не показаны) или отдельный тиристорный коммутатор. В приводах на базе ПРБУ тиристорный коммутатор входит в состав устройства.

Электропривод с дроссельным регулятором. Для точной остановки электроприводов малой мощности и легкого режима работы можно использовать схему с дроссельным регулятором скорости в цепи статора и индукционным

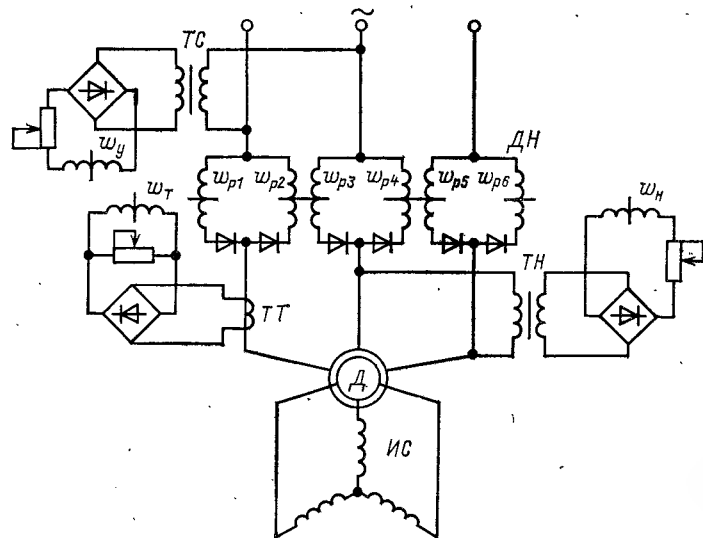


Рис. 35. Схема асинхронного дроссельного электропривода с индукционным роторным сопротивлением:

Д — двигатель; ДН — трехфазный дроссель насыщения; ИС — индукционное роторное сопротивление; ТН, ТТ, ТГ — трансформаторы; ω_y — обмотка регулирования; ω_t — обмотка положительной обратной связи по току; ω_n — обмотка отрицательной обратной связи по напряжению

трехфазным роторным сопротивлением (ИС), представленную на рис. 35. Такой электропривод позволяет при низкой частоте вращения выделить до 90% мощности потерь скольжения не в самом двигателе, а в индукционном сопротивлении. По мере снижения частоты вращения двигателя сопротивление катушек ИС возрастает пропорционально частоте тока в роторе, так что полное сопротивление машины остается примерно постоянным.

Регулируемый трехфазный дроссель насыщения имеет рабочие обмотки $\omega_{p1} - \omega_{p6}$ и три обмотки управления: регулирования ω_y , внешней положительной обратной связи по току ω_t и отрицательной обратной связи по напряжению статора ω_n . Для поддержания заданной частоты вращения с ростом момента нагрузки на валу автоматически увеличивается подмагничивание дросселя, так как возрастает ток в обмотке ω_t и уменьшается размагничивающее действие обмотки отрицательной обратной связи по напряжению ω_n . В результате уменьшается индуктивное сопротивление дросселя насыщения и возрастает напряжение на статоре двигателя.

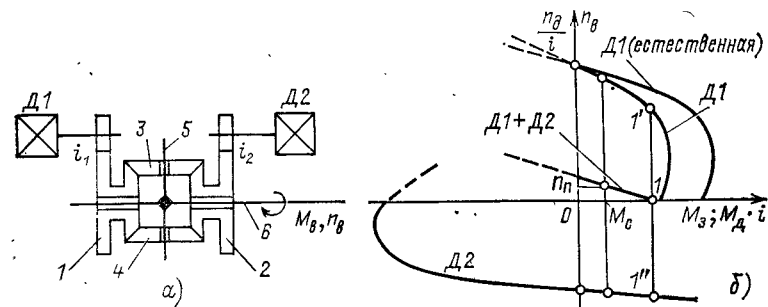


Рис. 36. Двухдвигательный электропривод с дифференциальным редуктором:

а — кинематическая схема; б — механические характеристики

Электропривод имеет диапазон регулирования частоты вращения до 1:15. Точность поддержания заданной частоты вращения равна 3—5% при изменении статического момента в пределах 0,4—1,5 $M_{ном}$. Вместо индуктивного роторного сопротивления можно использовать резисторы.

Двухдвигательный электропривод с дифференциальным редуктором. Для получения абсолютно точной остановки механизма у фиксирующего заданное положение механического упора может быть применен двухдвигательный электропривод с дифференциальным редуктором (рис. 36, а). Электродвигатели Д1 и Д2 через зубчатые передачи i_1 и i_2 ($i_1 < i_2$) приводят во вращение ведущие конические шестерни 1 и 2 механического дифференциала. Шестерни-сателлиты 3 и 4 вращаются вокруг своих осей и, кроме того, вместе с валом 5 совершают вращение в вертикальной плоскости, перпендикулярной рисунку. При этом приводится во вращение выходной вал 6. Оба двигателя работают одновременно. Когда двигатели работают согласно и шестерни 1 и 2 вращаются в одну и ту же

сторону, частота вращения выходного вала равна $n_{в1} = \frac{1}{2} (n_1 + n_2)$, где n_1 и n_2 — частоты вращения ведущих шестерен дифференциала 1 и 2. Механизм при этом имеет высокую рабочую скорость.

При подходе к заданному положению двигатель Д2 реверсируется и переходит в генераторный (рекуперативный) режим. Частота вращения выходного вала 6 становится равной $n_{в2} = \frac{1}{2} (n_1 - n_2)$. Если передаточные числа

i_1 и i_2 близки друг к другу, можно получить очень низкую скорость механизма. В момент подхода к упору выходной вал 6 останавливается, а оба двигателя продолжают вращаться. На рис. 36,б приведены механические характеристики двигателей Д1 и Д2 при встречном включении и результирующая характеристика привода при работе с низкой частотой вращения (Д1+Д2). Частоты вращения и моменты двигателей приведены к валам шестерен 1 и 2. В момент остановки у упора рабочими точками характеристик являются 1', 1'' и 1. При этом $n_1 = n_2$, благодаря тому что частота вращения двигателя Д1 несколько уменьшается, а частота вращения двигателя Д2 увеличивается.

Для ограничения момента на выходном валу в цепь статора двигателя Д1 (с меньшим передаточным числом) включаются добавочные резисторы (выбор резисторов см. в [2]). На рис. 36,б приведены две характеристики двигателя Д1 — естественная и искусственная с включенными резисторами. Работа на упор механизма с небольшим собственным моментом инерции получается практически безударной.

Передаточные числа от валов двигателей к дифференциалу равны

$$i_1 = \frac{n_{01}}{n_{в, \max} + n_{в, \min}}$$

$$i_2 = \frac{n_{02}}{n_{в, \max} - n_{в, \min}}$$

где n_{01} и n_{02} — частоты вращения холостого хода двигателей Д1 и Д2; $n_{в, \max}$ и $n_{в, \min}$ — частоты вращения выходного вала 6 при согласном и встречном включении двигателей на холостом ходу.

Двухдвигательные электроприводы с дифференциальным редуктором нашли применение, в частности, на ряде металлургических механизмов, работающих на упор.

4. ТОЧНАЯ ОСТАНОВКА ЭЛЕКТРОПРИВодОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Когда по условиям технологии требуется плавное регулирование скорости механизма в большом диапазоне и высокое быстроедействие, применяется электропривод постоянного тока. Двигатель постоянного тока (обычно независимого возбуждения) получает питание от источника регулируемого напряжения: тиристорного преобразователя или генератора постоянного тока. Подобные системы электропривода обеспечивают регулирование частоты вращения в большом диапазоне (до 1:1000 и более), и осуществление точной остановки, если она требуется, не представляет труда. Если же механизм приводится двигателем, который питается от цеховой сети постоянного тока, то для получения устойчивой пониженной частоты вращения (обычно до 15—20% номинальной) используются схемы шунтирования якоря электродвигателя резисторами.

Схема шунтирования якоря двигателя параллельного возбуждения (рис. 37). С помощью резисторов — добавочного R_d и шунтирующего $R_{ш}$ — напряжение на якоре снижается и соответственно падает частота вращения двигателя. Если на естественной характеристике 1 (рис. 37,б) частота вращения холостого хода равна n_0 , то при шунтировании якоря (характеристика 3) она понижается до $n_{0ш}$. Значение этой частоты вращения можно определить по формуле

$$n_{0ш} = n_0 \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_d} \quad (17)$$

Например, если принять $R_{ш} = 0,25R_{ном}^*$, а $R_d = 0,5R_{ном}$, то частота вращения холостого хода снижается вдвое:

$$n_{0ш} = n_0 \frac{0,25R_{ном}}{0,25R_{ном} + 0,5R_{ном}} = \frac{n_0}{3}$$

При моменте нагрузки M_c получим при шунтировании якоря пониженную частоту вращения (рис. 37,б), которая является значительно более устойчивой, чем при работе на реостатной характеристике 4. Характеристика 2 получается при включенном R_d и отключенном $R_{ш}$.

Расчет шунтирующего и добавочного резисторов для получения пониженной частоты вращения легко выполняется графоаналитическим методом. Рассмотрим этот расчет на конкретном примере.

* Номинальное сопротивление $R_{ном} = U_{ном} / I_{ном}$.

Пример 4. Механизм приводится двигателем постоянного тока с параллельным возбуждением типа Д-41, 16 кВт, 220 В, 86 А, 690 об/мин; сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}} = 0,195 \text{ Ом}$. Рассчитать значения сопротивлений добавочного и шунтирующего резисторов для получения пониженной частоты вращения перед остановкой $n_{\text{п}} = 0,2 n_{\text{ном}}$ при моменте нагрузки на валу $M_{\text{с}} = 0,8 M_{\text{ном}}$.

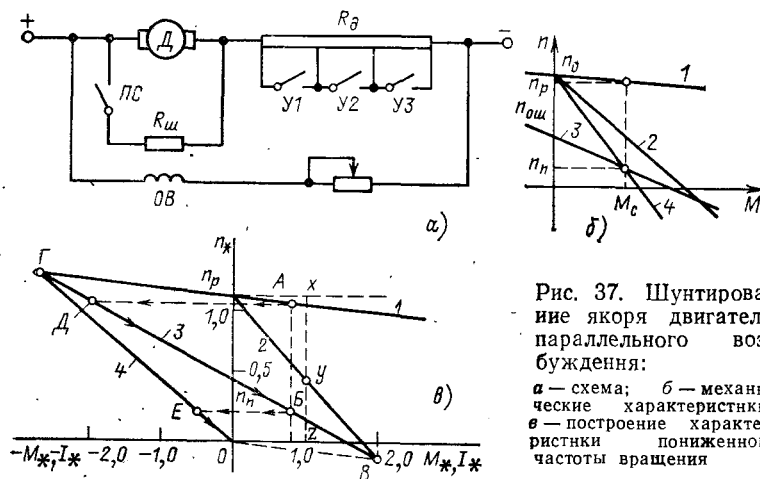


Рис. 37. Шунтирование якоря двигателя параллельного возбуждения:

а — схема; б — механические характеристики; в — построение характеристики пониженной частоты вращения

Для расчета сопротивлений строятся характеристики — естественная 1 и реостатная 2 (рис. 37,б). Характеристика 2 соответствует полностью введенным пусковым резисторам. Эта характеристика строится при выборе пусковой диаграммы. Примем, что при шунтировании якоря в качестве добавочного сопротивления используются все пусковые ступени. Проведем вертикальную прямую через точку $M = M_{\text{ном}}$ ($M_* = 1$).

Сопротивление добавочного резистора находим по формуле

$$R_{\text{д}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} \frac{xy}{xz} - R_{\text{я}} = \frac{220}{86} \frac{11}{19} - 0,195 = 1,28 \text{ Ом}.$$

Первую точку искомой механической характеристики шунтирования якоря B находим, отложив при $M_{\text{с}} = 0,8 M_{\text{ном}}$ значение $n_{\text{п}} = 0,2 n_{\text{ном}}$. Вторая точка B находится как пересечение характеристики 2 с прямой OB, параллельной естественной характеристике 1. Через точки B и В проводится искомая характеристика 3 до пересечения с естественной в точке Г. Сопротивление шунтирующего резистора $R_{\text{ш}}$ определяется по формуле

$$R_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{я,Г}}} = \frac{220}{2,7 \cdot 86} = 0,95 \text{ Ом},$$

где $I_{\text{я,Г}}$ — ток якоря, соответствующий точке Г.

Если ток якоря в точке Г превысит допустимый (для двигателей постоянного тока серий П и 2П кратковременно допустима при полном потоке токовая перегрузка в 2,5 раза, а для двигателей серии Д со стабилизирующей обмоткой — в 3 раза), то необходимо увеличить $R_{\text{д}}$ или $R_{\text{ш}}$.

Для точной остановки двигателя по команде путевого датчика предварительного замедления контактором ПС включается резистор $R_{\text{ш}}$; контакторы ускорения У1, У2, У3 отключаются, вводя добавочный резистор $R_{\text{д}}$. Двигатель из точки А переходит, как показано стрелкой, в точку Д (рис. 37,б) и под влиянием отрицательного электромагнитного момента и статического момента сопротивления на валу замедляется до пониженной частоты вращения $n_{\text{п}}$ (точка Б).

По команде датчика точной остановки двигатель отключается от сети и останавливается под действием динамического торможения (из точки Б переходит на характеристику динамического торможения в точку Е и далее замедляется до полной остановки).

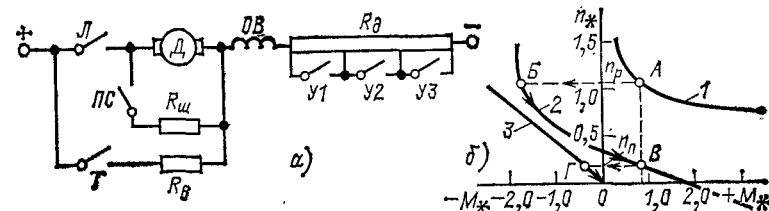


Рис. 38. Шунтирование якоря двигателя последовательного возбуждения:

а — схема; б — механические характеристики

Схема шунтирования якоря двигателя последовательного возбуждения. Для получения пониженной частоты вращения двигателя последовательного возбуждения следует использовать схему шунтирования резистором только якоря (без последовательной обмотки возбуждения, рис. 38,а). Благодаря тому что даже при отсутствии нагрузки на двигателе обмотка возбуждения обтекается током через шунтирующий резистор $R_{\text{ш}}$, двигатель развивает низкую частоту вращения даже при малых статических моментах.

Механические характеристики привода показаны на рис. 38,б. Характеристика 1 естественная; характеристика низкой частоты вращения 2 построена для значений сопротивлений добавочного и шунтирующего резисторов $R_{\text{д}} = 0,5 R_{\text{ном}}$ и $R_{\text{ш}} = 0,25 R_{\text{ном}}$. Чем меньше шунтирующее сопротивление, тем ниже частота вращения двигателя. Обычно используют пониженные частоты вращения до 15—20% номинальной.

Рассмотрим процесс замедления двигателя для получения точной остановки. По команде путевого датчика предварительного замедления включается контактор ПС — вводится в работу шунтирующий резистор $R_{ш}$. Одновременно отключаются контакторы ускорения У1, У2, У3. Двигатель, работавший на естественной характеристике в точке А (рабочая частота вращения n_p), переходит в режим генераторного торможения и замедляется до пониженной частоты вращения $n_{п}$ (стрелками показан переход из точки А в точку Б и далее в точку В). После кратковременной работы двигателя при пониженной частоте вращения срабатывает датчик точной остановки. Отключается линейный контактор Л и включается контактор Т, дающий независимое питание обмотке возбуждения. Двигатель получает полный поток, переходит в режим динамического торможения по характеристике 3 (из точки В в точку Г) и останавливается. В случае необходимости используется также механический тормоз.

Добавочный резистор R_b выбирается таким, чтобы через обмотку возбуждения ОВ проходил номинальный ток:

$$R_b = \frac{U_{ном}}{I_{ном}} - (R_d + R_{о.в.}),$$

где $R_{о.в.}$ — сопротивление обмотки возбуждения.

Выбор резисторов по нагреву см. в [7].

5. КОМАНДОАППАРАТЫ И КОНЕЧНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ. ПОГРЕШНОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ АППАРАТОВ

В схемах автоматической точной остановки электроприводов широко используют различные командоаппараты и конечные выключатели. Эти два типа аппаратов отличаются по принципу действия. Регулируемые кулачковые командоаппараты имеют барабаны с переключающими шайбами, воздействующими на контактную систему. Вал командоаппарата соединяется через зубчатые или цепные передачи с приводом механизма. Контакты переключаются при определенных углах поворота барабана в зависимости от пройденного механизмом пути.

Конечные выключатели устанавливаются в определенных точках пути механизма и приводятся в действие переключающими упорами, установленными на механизмах. Переключающий упор чаще всего выполняется в виде

прямолинейной металлической пластины со скошенными краями. Такой упор называют «линейкой».

Для обеспечения безаварийной надежной работы схем управления и получения требуемой точности остановки электропривода необходимо правильно выбрать тип командоаппарата или конечного выключателя с учетом свойств данному аппарату погрешности (неточности срабатывания), соответствующего конструктивного исполнения (защищенное, пыленепроницаемое, водозащищенное, взрывозащищенное), требуемого для срабатывания усилия, максимально допустимой скорости переключающего упора и т. д.

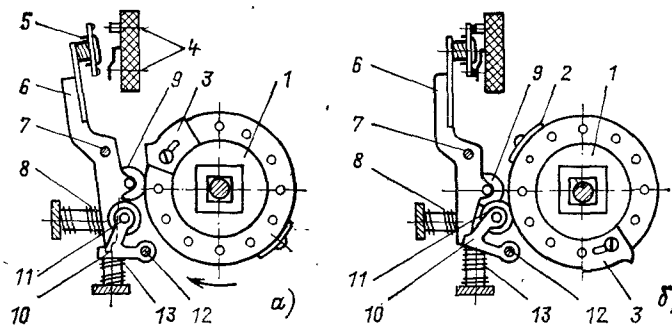


Рис. 39. Конструкция командоаппарата серии КА4000:

а — контакты разомкнуты; б — контакты замкнуты

Командоаппараты. На рис. 39 приведен разрез регулируемого командоаппарата серии КА4000. На валу барабана имеются шайбы 1 с переключающими кулачками 2 и 3. На каждой шайбе может быть установлено до трех включающих и трех отключающих кулачков. Кулачки могут переставляться в различные точки по окружности шайбы. Подвижные контакты 5, замыкающие неподвижные 4 укреплены на рычаге 6, вращающемся вокруг оси 7. Число рычагов с контактами может достигать 24. Под действием пружины 8 контакты удерживаются в разомкнутом состоянии. В определенном положении механизма кулачок 2 воздействует на ролик 9, рычаг 6 поворачивается и контакты 4 замыкаются. Во включенном состоянии контакты удерживаются защелкой 10, вращающейся вокруг оси 12. В поднятом положении защелка удерживается пружиной 13. В момент нажатия кулачка 3 на ролик 11 защелка освобождается и под действием пружины 8 происходит

мгновенное размыкание контактов¹. Кулачки 2 и 3 могут нажимать соответственно на ролики 9 и 11.

Частота вращения барабана не должна превышать 60 об/мин при одном включающем и одном отключающем кулачке на шайбе. При увеличении числа кулачков частота вращения барабана должна быть соответственно уменьшена. Так, при четырех кулачках на шайбе частота вращения не должна превышать 30 об/мин. Необходимо иметь в виду, что включающий и отключающий кулачки должны быть смещены на угол не менее 21°.

Конструкция контактного и переключающего устройства обеспечивает точность замыкания или размыкания контактов командоаппаратов КА4000, равную $\pm 0,5^\circ$ угла поворота кулачковой шайбы. Для реверсивных механизмов, требующих высокой точности остановки, передаточное число от механизма к барабану командоаппарата выбирается таким образом, чтобы угол поворота барабана за полный ход механизма был равен приблизительно 320—340°. Угол выбирается менее одного оборота, но близким к 360°. Это объясняется тем, что погрешность $\pm 0,5^\circ$ дает тем меньшую ошибку в пути механизма, чем больше соответствующий угол поворота барабана. Так, например, при ходе механизма 3000 мм и угле поворота барабана 300° ошибка $\pm 0,5^\circ$ составляет ± 5 мм пути механизма; если же выбрать угол в 10 раз меньшим, т. е. 30°, то та же ошибка командоаппарата приведет к неточности остановки ± 50 мм, т. е. в 10 раз большей.

Для неревверсивных механизмов, совершающих «шаговое» перемещение равными отрезками (цепные транспортеры, кольцевые конвейеры, вращающиеся столы), угол поворота барабана командоаппарата за один шаг должен быть равен 360°.

Наиболее надежными являются командоаппараты типа КА4658 водозащищенного исполнения. Командоаппараты КА4658 имеют пять цепей, что позволяет получать необходимые команды как для предварительного перехода на пониженную частоту вращения, так и на окончательное затормаживание электропривода.

Промышленностью выпускаются также командоаппараты серии КА400. При частоте вращения барабана 30 об/мин погрешность командоаппарата равна $\pm 0,5^\circ$.

¹ Командоаппаратами и конечными выключателями с мгновенным, или «моментным», размыканием контактов называют такие аппараты, у которых размыкание контактов происходит за короткий промежуток времени, не зависящий от скорости движения механизма.

Однако эти командоаппараты не имеют мгновенного размыкания контактов, что может приводить к обгоранию контактов при низкой скорости механизма и к увеличенной неточности срабатывания.

Для взрывоопасных производств предназначены взрывозащищенные командоаппараты типа КА4800, по конструкции аналогичные КА4000, а также командоаппараты ВП701. Командоаппарат ВП701 содержит три встроенных микропереключателя. Контакты могут работать в цепи 380 В при нагрузке 3 А. Кулачковый вал соединен с приводным валом через червячный редуктор с передаточным отношением 1:50.

Следует иметь в виду, что высокая точность остановки электропривода с помощью командоаппарата не может быть получена, если используется канатный привод, так как из-за вытягивания канатов меняется соотношение между положением механизма и углом поворота барабана командоаппарата. Нельзя применять командоаппараты в тех случаях, когда при работе механизма возможно проскальзывание, например буксовка колес самоходной тележки и т. п. В этих случаях необходимая точность остановки достигается применением конечных выключателей.

Конечные выключатели. Электропромышленностью выпускается много типов конечных выключателей, различающихся по степени защиты от окружающей среды (открытые, пыле- и брызгозащищенные, водозащищенные и взрывозащищенные), по скорости размыкания контактов, габаритам, точности работы, конструктивному исполнению (выключатели с рычагом и роликом, с нажимным толкателем, штифтом и др.), значению коммутируемого тока и т. д. На производственных механизмах наиболее широко применяют конечные выключатели следующих типов: крановые конечные выключатели КУ-700А (КУ-701А, КУ-703А, КУ-704А, КУ-706А); выключатели ВК-200Г, ВК-300Г; выключатели серий ВПК-1000, ВПК-2000, ВПК-4000, ВП62, взрывозащищенные конечные выключатели ВКМ-ВЗГ, ВПВ, ВУВ и др. Необходимые для выбора конечных выключателей технические данные приведены в приложении 2.

Для обеспечения точной остановки механизма конечный выключатель, подающий команду на замедление электропривода, должен вносить минимальную погрешность, вызываемую разбросом в срабатывании, контактов аппарата. Причиной этой погрешности являются изме-

нение температуры, влажности, смазки трущихся поверхностей и т. д.

Так как обычно точная остановка достигается предварительным переводом электродвигателя на пониженную частоту вращения, при выборе конечного выключателя для исключения замедленного разрыва цепи и повышения точности остановки следует отдавать предпочтение выключателям с моментным размыканием контактов.

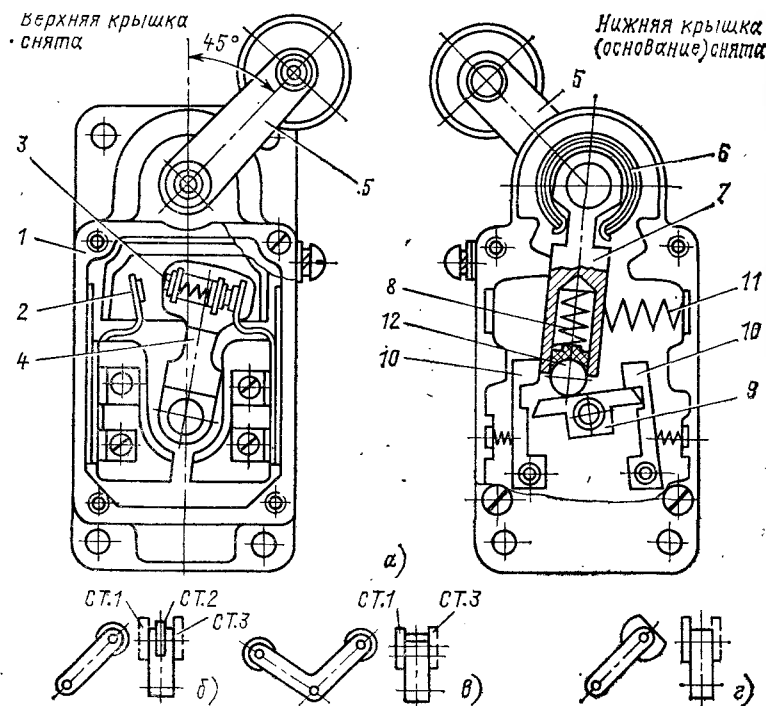


Рис. 40. Конечный выключатель ВК-300Г:

а — конструкция; б — исполнение 1, ступени 1, 2 и 3; в — исполнение 2, ступени 1 и 3; г — исполнение 3, ступени 1 и 3

Конечные выключатели ВК-200Г и ВК-300Г. Рассмотрим устройство и принцип действия конечных выключателей с моментным размыканием контактов на примере выключателя ВК-300Г (рис. 40,а). В корпусе 1 установлены неподвижные контакты 2. Подвижные контакты 3 укреплены на рычаге 4. Переключение контактов осуществляется поворотом приводного рычага 5, соединенного при помощи набора ленточных пружин 6 с поводком 7. При повороте приводного рычага под действием усилия пружины 8, передаваемого на шарик 12, планка 9, жестко связанная с рычагом 4, мгновенно поворачивается в момент освобождения ее собачкой 10. При этом контакты выключателя переключаются. Время переключения контактов равно 0,04 с даже при очень низкой скорости переключающего упора 10 мм/мин. Во всех исполнениях выключателей, кроме второго (рис. 40,б — г), возврат контактов в исходное положение осуществляется пружиной 11.

Выключатель ВК-200Г имеет пыле- и брызгозащищенное исполнение, а выключатель ВК-300Г — водозащищенное исполнение. Выключатели имеют один замыкающий и один размыкающий контакты. Корпус выключателя может быть установлен в любом положении. Рычаг с роликом может быть установлен под любым углом. Рабочий угол поворота рычага равен $12 \pm 2^\circ$, полный ход может составлять 22° . Свободный дополнительный ход служит для защиты от поломок. Скорость движения механизма не должна превышать 30 м/мин. В исходном положении рычаг с роликом устанавливают под углом $\gamma = 45^\circ$ к оси корпуса выключателя при скорости механизма до 15 м/мин и под углом $\gamma = 55^\circ$ при скорости более 15 м/мин (см. рис. 55,а).

Неточность срабатывания выключателя, характеризующая наибольшим отклонением пластины от среднего положения в момент переключения, равна $\pm 0,2$ мм. Среднее положение пластины в момент срабатывания конечного выключателя определяется в результате большого числа опытов.

Необходимо иметь в виду, что конечные выключатели ВК-200Г и ВК-300Г, выполненные с обычным роликом, являются аппаратами одностороннего действия (переключение производится при нажатии на выключатель с одной определенной стороны). Когда выключатель фиксирует не крайнее, а промежуточное положение механизма и возможно движение переключающей пластины с разных сторон, нужно устанавливать конечный выключатель со срезанным роликом (исполнение 3; рис. 40,г). При движении пластины в обратном направлении ролик поворачивается вокруг своей оси, а рычаг остается неподвижным: после прохода пластины ролик под действием пружины поворачивается в исходное положение. Можно также использовать выключатель с двумя роликами (исполнение 2).

Для повышения надежности выключателей ВК-200Г и ВК-300Г рекомендуется их контакты, работающие в индуктивных цепях постоянного тока 110 и 220 В, шунтировать.

Для повышения надежности выключателей ВК-200Г и ВК-300Г рекомендуется их контакты, работающие в индуктивных цепях постоянного тока 110 и 220 В, шунтировать.

ровать искрогасительной RC-цепью. Для цепи 110 В используют резистор 0,8 Ом, 5 Вт и конденсатор 0,5 мкФ, 1000 В; в цепи 220 В — резистор 1 Ом, 5 Вт и конденсатор 0,25 мкФ, 1500 В. Выключатели ВК-200Г и ВК-300Г допускают до 1200 срабатываний в час.

В настоящее время подготовлены к производству усовершенствованные конечные выключатели ВП16, которые заменяют ВК-200Г и ВК-300Г.

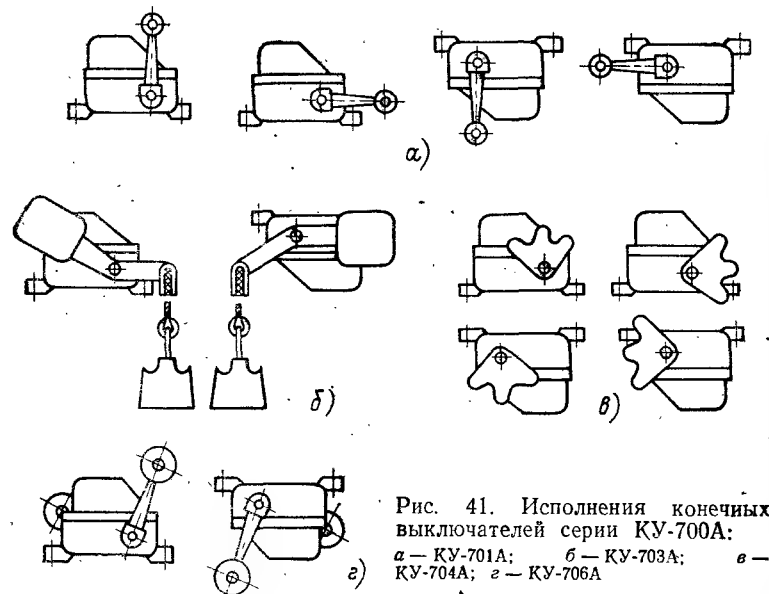


Рис. 41. Исполнения конечных выключателей серии КУ-700А:
а — КУ-701А; б — КУ-703А; в — КУ-704А; г — КУ-706А

Конечные выключатели серии КУ-700А, первоначально разработанные для кранов, имеют мощные контакты, надежно и с высокой точностью отключающие токи катушек контакторов при достаточно низких скоростях механизмов. Они выпускаются в следующих исполнениях: КУ-701А, КУ-703А, КУ-704А и КУ-706А (рис. 41). Максимальная скорость механизма равна 150 м/мин для КУ-701А, 100 м/мин для КУ-704А и 300 м/мин для КУ-706А. Для КУ-703А предельная скорость движения не ограничивается.

Выключатели применяют в схемах управления для ограничения линейного передвижения механизмов: КУ-701А — при небольших значениях выбега, КУ-704А, КУ-706А — с любым выбегом, КУ-703А ограничивают ход механизмов подъема. Органом воздействия на привод выключателей служит: для КУ-701А, КУ-706А — ограничительная

линейка механизма, для КУ-704А — штырь, для КУ-703А — полка, укрепленная на траверсе крюка крана, которая поднимает или опускает груз приводного рычага выключателя.

Основным типом является конечный выключатель КУ-701А. Он может быть установлен в любом положении; рычаг с роликом может устанавливаться под углом 90 и 180° по отношению к нормальному положению. В отличие от ВК-200Г и ВК-300Г рычаг выключателя КУ-701А имеет три положения, КУ-701А является аппаратом двустороннего действия.

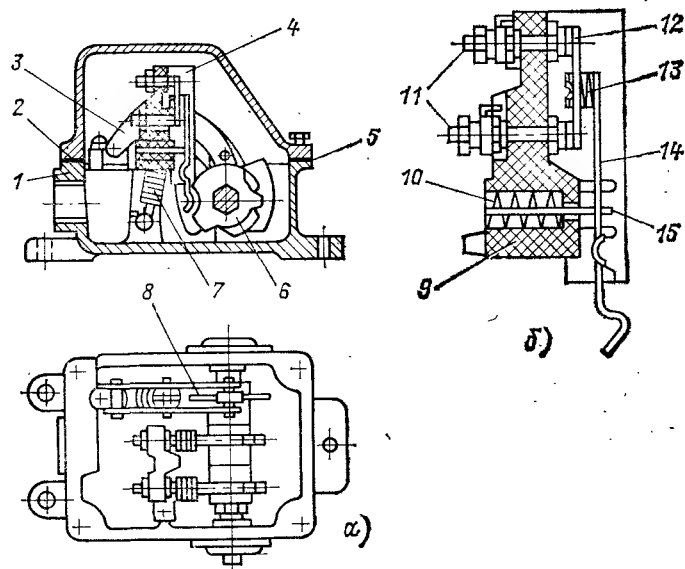


Рис. 42. Конструкции конечного выключателя КУ-701А:

1 — корпус; 2 — крышка; 3 — фиксирующий механизм; 4 — блок элементов; 5 — прокладка уплотняющая; 6 — барабан кулачковый; 7 — пружина фиксатора; 8 — храповик; 9 — рейка; 10 — пружина рычага; 11 — болты контактные; 12 — мостик контактный; 13 — пружина мостика; 14 — рычаг; 15 — пластина рычага

На рис. 42, а показан разрез выключателя (без приводного рычага с роликом). Внутри корпуса закреплены блок кулачковых элементов, кулачковый барабан и фиксирующее устройство. Блок кулачковых элементов (рис. 42, б) состоит из основания, на котором укреплены контактные болты с неподвижными контактами и два рычага с контактными мостиками. Пружины рычагов с помощью пластин удерживают в замкнутом положении

контакты мостика с контактами болтов. При повороте кулачкового барабана выступ кулачковой шайбы нажимает на выступ рычага и контакты размыкаются. Кулачковый барабан имеет вал, на котором жестко закреплен приводной рычаг. В кулачковом барабане есть фигурная пластина (храповик), на которую воздействует фиксирующий механизм, удерживая барабан, а одновременно и привод в том или ином рабочем положении.

Исследования конечных выключателей серии КУ-700А показали высокую точность их работы. При скоростях движения механизма выше 1 м/с заметных погрешностей не наблюдалось.

Конечные выключатели серий ВПК-1000, ВПК-2000 и ВПК-4000 нашли применение в машиностроении. Они отличаются большим разнообразием конструктивных исполнений. Привод может быть выполнен в виде толкателя, толкателя с роликом, рычага с роликом и т. д. Некоторые типы выключателей изготавливаются с селективным приводом, реагирующим на движение переключающей пластины лишь в одном направлении.

Конечный выключатель ВПК-1000 содержит встроенный микровыключатель типа МП-110 и может работать в цепях переменного тока до 380 В и постоянного тока до 220 В. Выключатель имеет один замыкающий и один размыкающий контакты. Рабочий ход в исполнении с толкателем равен 2,4 мм, дополнительный ход 5 мм; в исполнении с рычагом и роликом эти показатели равны соответственно $15 \pm 5^\circ$ и 25° . Корпус выключателя защищен от проникновения пыли и брызг воды.

Конечные выключатели серии ВПК-2000 — прямого действия. Погрешность срабатывания по пути перемещения механизма при скорости 20 мм/мин составляет $\pm 0,3$ мм для исполнения привода в виде рычага с роликом и $\pm 0,1$ мм для исполнения с толкателем. Выключатель имеет один замыкающий и один размыкающий контакты. Корпус пылеводонепроницаемый, маслостойкий.

Конечные выключатели серии ВПК-4000 имеют до четырех контактов в любой комбинации, которые могут работать в цепях переменного тока до 660 В и постоянного тока до 440 В. Контактная система — прямого действия с двойным разрывом цепи. Минимальные ток и напряжение, при которых надежно работает контактная система, равны 0,05 А и 12 В. Погрешность срабатывания по пути равна $\pm 0,1$ мм. Корпус выполняется в водозащищенном и других исполнениях.

Взрывозащищенные конечные выключатели ВКМ-ВЗГ и ВПВ. Малогабаритные выключатели ВКМ-ВЗГ содержат встроенный микропереключатель с моментным размыканием контактов. Выключатель предназначен для работы в цепях 380 В, 50 Гц и 220 В постоянного тока. Номинальный ток контактов 2,5 А. Приводное устройство выполняется в виде рычага с роликом или толкателя. Рабочий ход штока 1—2 мм, дополнительный ход после срабатывания 4 мм.

Конечный выключатель ВПВ имеет аналогичные конструкции приводных устройств, содержит два — четыре контакта моментного переключения. Время срабатывания равно 0,04 с.

Погрешности по пути конечных выключателей ВКМ-ВЗГ и ВПВ примерно равны погрешностям выключателей ВПК-2000 и ВПК-4000.

Описанные выше командоаппараты и конечные выключатели получили широкое распространение. Они являются простыми и дешевыми аппаратами; точность некоторых из них достаточно высока. Однако эти аппараты имеют ряд существенных недостатков. Для них характерны относительно невысокая предельная скорость механизма, ограниченный срок службы из-за износа механической части и электрической эрозии контактов, ограниченные быстродействие и допустимая частота включений. Кроме того, эти аппараты являются источниками шума и радиопомех, требуют периодической регулировки. Поэтому в схемах управления механизмами все чаще применяются бесконтактные датчики положения механизмов и командоаппараты.

6. БЕСКОНТАКТНЫЕ ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ И КОМАНДОАППАРАТЫ

Наиболее распространены бесконтактные датчики положения следующих типов: индуктивные, генераторные, магнитогерконовые и фотоэлектронные. Указанные датчики не имеют механического контакта с подвижным объектом, положение которого контролируется. Бесконтактные датчики положения обеспечивают высокое быстродействие и большую частоту включений механизма. Определенным недостатком этих датчиков является зависимость их точности от изменения напряжения питания и температуры. В зависимости от требований выходным ап-

паратом этих устройств может быть как бесконтактный логический элемент, так и электрическое реле.

В схемах точной остановки электроприводов бесконтактные датчики могут использоваться как для подачи команды на переход к пониженной частоте вращения, так и для окончательной остановки. Точная остановка обеспечивается применением специальных электрических схем, одна из которых будет рассмотрена ниже.

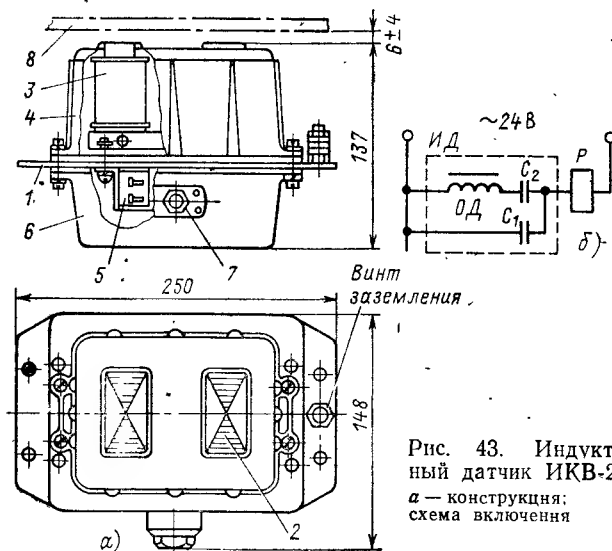


Рис. 43. Индуктивный датчик ИКВ-22:
а — конструкция; б — схема включения

Индуктивные датчики ИКВ-22. Работа этих датчиков основана на принципе изменения индуктивного сопротивления катушек со стальным сердечником при изменении воздушного зазора в магнитной цепи. На стальной плите 1 (рис. 43,а) установлен магнитопровод 2 с двумя катушками 3, закрытый пластмассовой крышкой 4. С нижней стороны к плите крепятся два конденсатора 5 типа МБГП (один емкостью 15 мкФ, 200 В, второй — 10 мкФ, 400 В). Конденсаторы закрыты силиконовой крышкой 6. Подключение кабеля производится через сальниковый ввод 7. На механизме устанавливается магнитный шунт 8, размеры которого должны быть не менее: толщина 2 мм, ширина 80 мм, длина 140 мм. Воздушный зазор между магнитопроводом и шунтом равен 6 ± 4 мм.

Схема включения индуктивного датчика ИД и выходного реле Р приведена на рис. 43,б. Выходное реле нор-

мально включено и отключается в момент прохождения магнитного шунта над датчиком, когда из-за изменения индуктивного сопротивления катушки наступает резонанс токов и ток через обмотку реле падает. Данные реле Р: тип МКУ-48, 12 В переменного тока, ток втягивания не более 0,45 А, ток отпадания не менее 0,1 А. Напряжение питания цепи датчик — реле 24 В переменного тока.

Рассмотрим, как осуществить схему точной остановки механизма с использованием индуктивных датчиков. Схема расположения датчиков для точной остановки в заданном положении 0 приведена на рис. 44,а. Движение к заданному положению возможно с двух сторон, поэтому устанавливаются два индуктивных датчика предварительного

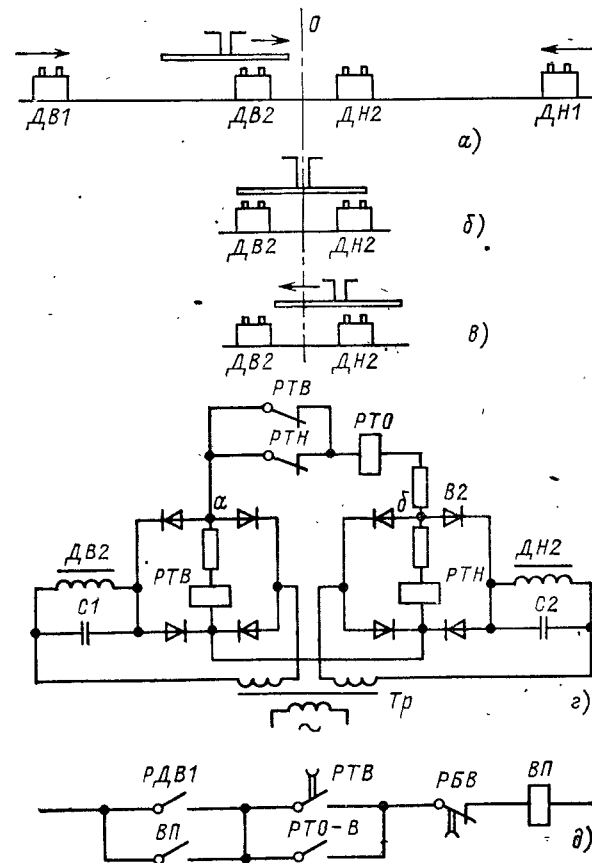


Рис. 44. Точная остановка с помощью индуктивных датчиков:
а, б, в — расположение датчиков и положения шунтирующей пластины; г — дифференциальная схема включения датчиков; д — узел включения контактора ВП

снижения скорости *ДВ1* и *ДН1*. Слева и справа от позиции останова *0* располагаются датчики точной остановки *ДВ2* и *ДН2*.

В схеме управления (рис 44,з) используются два реле точной остановки *РТВ* и *РТН*, включенные через выпрямительные мосты в цепи катушек индуктивных датчиков *ДВ2* и *ДН2*. Питание датчиков осуществляется от трансформатора *Тр*. Датчики шунтируются конденсаторами *С1* и *С2*. Поляризованное реле точной остановки *РТО* (например, типа РП-5) включается на зажимы *а* и *б*. Реле *РТО* срабатывает, когда один датчик *ДВ2* или *ДН2* перекрыт магнитным шунтом (рис. 44,а).

Рассмотрим в качестве примера случай движения слева направо (вперед). Когда магнитный шунт проходит над датчиком *ДВ2*, ток в цепи этого датчика уменьшается, реле *РТВ* отпадает, а на зажимах *а—б* появляется напряжение. Размыкающий контакт *РТВ* в цепи реле *РТО* закрывается, реле *РТО* срабатывает. На рис. 44,б показан узел включения контактора пониженной скорости в направлении вперед *ВП*. Контактор *ВП* включается в момент срабатывания реле *РДВ1* индуктивного датчика *ДВ1*. При включении реле *РТО* контакт *РТО-В* замыкается, замыкающий контакт *РТВ* с выдержкой времени открывается, и контроль за точной остановкой осуществляет реле *РТО*. Когда механизм окажется в заданном положении, оба датчика *ДВ2* и *ДН2* будут перекрыты шунтом (рис. 44,б). Токи в цепях катушек *ДВ2* и *ДН2* сравняются, разность потенциалов между точками *а* и *б* станет равной нулю. Реле *РТО* отпадет, контактор *ВП* отключится, и двигатель остановится.

Если механизм по инерции пройдет лишний путь и шунт не будет перекрывать датчик (рис. 44,в), сработает реле *РТВ* и отпадет реле *РТН*. На катушке *РТО* появится напряжение обратной полярности, замкнется другой контакт *РТО-Н*, механизм на пониженной скорости включится в направлении назад и после прихода в заданное положение остановится (этот узел схемы на рис. 44 не показан). Ложное включение контактора *ВП* в положении рис. 44,в исключается блокировочным реле *РБВ*, размыкающий контакт которого открывается при подходе шунта слева к датчику *ДН2*.

В металлургических цехах используют индуктивные датчики типа ИД-5, рассчитанные для работы при температуре окружающей среды до $+80^{\circ}\text{C}$ и влажности до 100%. Допустимо присутствие токопроводящей пыли и окалины. В комплекте с датчиком применяют выходной полупроводниковый усилитель типа УИД-10. Выходная мощность усилителя (25 Вт) достаточна для включения широко распространенных реле РЭВ-800, контакторов КП21 и МК-1, электропневматических вентилях ВВ-32 и т. д. Воздушный зазор между датчиком и контролируемым ферромагнитным объектом может достигать 30 мм. Размеры датчика ИД-5 $187 \times 170 \times 70$ мм, напряжение питания $220 \text{ В} \pm \pm 15\%$, 50 Гц.

На металлорежущих станках находят применение малогабаритные путевые переключатели БСП-2 (с бесконтактным выходом на логический элемент) и БРП (с выходом на реле ПЭ-21, 24 В, 16 Ом). Переключатель БСП-2 состоит из дифференциально-трансформаторного датчика и полупроводникового триггера. Магнитная система первой катушки датчика зашунтирована стальной пластиной, а вторая катушка шунтируется при перемещении над ее магнитной системой связанного с механизмом плоского якоря. Катушки включены встречно. Если якорь находится над датчиком, индуктивные сопротивления катушек равны и выходной сигнал дифференциально-трансформаторного датчика равен нулю. При этом на выходе триггера появляется напряжение не менее 2,5 В, достаточное для срабатывания логического элемента. При отсутствии якоря над датчиком на триггер подается напряжение, возвращающее его в исходное состояние. Выходной сигнал переключателя при этом равен нулю. Выход переключателя БСП-2 при работе на логический элемент серии «Логика-Т» необходимо шунтировать конденсатором емкостью 15 мкФ, 20 В.

Принцип действия переключателя БРП во многом аналогичен БСП-2. Внутри корпуса смонтированы индуктивный датчик (по схеме дифференциального трансформатора), триггер и усилитель. Вторичные катушки, имеющие разное число витков, включены встречно. По мере перекрытия якорем магнитной системы датчика сигнал уменьшается, а после изменения его фазы переключается триггер и срабатывает внешнее выходное реле (ПЭ-21, 24 В, 16 Ом). Якорь, закрепленный на механизме, имеет размеры $80 \times 15 \times 3$ мм. Зазор между якорем и датчиком 4 мм. Точность выключателей в номинальном режиме составляет $\pm 0,5$ мм, дифференциал срабатывания — не более 5 мм. При колебаниях напряжения питания и температуры погрешность переключателей БСП-2 и БРП может достигать $\pm (2,5 \div 3,0)$ мм.

Для автоматизации металлорежущих станков используют также высокоточные индуктивные датчики типа ВКБ-21-18 с П-образным или плоским якорем. Полюсы встроенного трансформатора образуют разомкнутую электромагнитную систему. Рабочий воздушный зазор равен 0,1—0,15 мм. Выходное напряжение с вторичной обмотки трансформатора подается на дифференциальную измерительную схему, а затем на транзисторный усилитель. Суммарная погрешность датчика при колебаниях температуры от 5 до 40°C и напряжения от 85 до 110% номинального значения составляет $\pm (0,06 \div 0,15)$ мм, дифференциал срабатывания не превышает 0,4 мм. Максимальная скорость движения механизма равна 10 м/мин. Размеры датчика $62 \times 34 \times 24$ мм. Напряжение питания 12 В.

Специальные типы станочных прецизионных индуктивных датчиков с дифференциальной схемой имеют погрешность менее $\pm 0,01$ мм. К таким датчикам относится путевой бесконтактный выключатель типа ВПБ12, состоящий из блока датчика и электронного блока. В блок

датчика входят индуктивный рабочий датчик, индуктивный компенсационный датчик и печатные платы. На механизме устанавливается управляющий ферритовый элемент. Напряжение питания 12 В постоянного тока. Максимальное расстояние воздействия — не более 0,12 мм.

Основная погрешность по пути выключателя ВПБ12 равна $2,5 \cdot 10^{-3}$ мм, суммарная предельная погрешность при изменении температуры на $\pm 7,5^\circ\text{C}$ и напряжения питания на $\pm 1\%$ составляет $5 \cdot 10^{-3}$ мм. Дифференциал срабатывания — не более 0,6 мм. На выходе датчика могут быть включены элементы серий «Логика-Т» и «Логика-И» или реле типа РПУ-0. Максимальный ток нагрузки выходного аппарата 0,16 А.

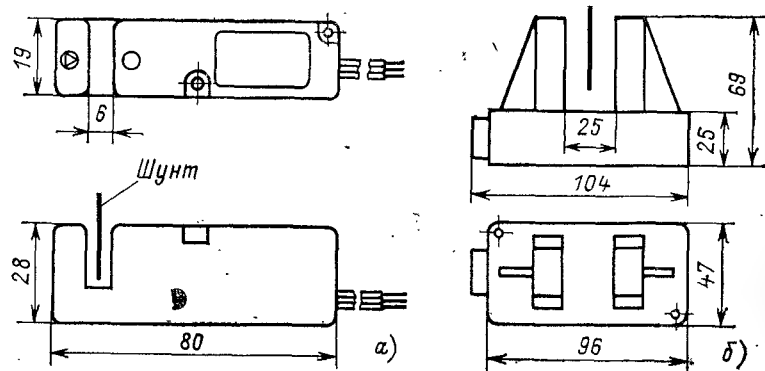


Рис. 45. Генераторные датчики КВД-6М (ПИЩ-6-1) (а) и КВД-25. (б)

Генераторные датчики. Датчики этого типа отличаются компактностью и высокой точностью. Хорошо зарекомендовали себя генераторные датчики серий КВД-6М и КВД-25 (щелевые), КВП-8 и КВП-16 (плоскостные). Они пригодны для использования при повышенной концентрации влаги и пыли. В корпусе из ударопрочного полистирола размещены элементы транзисторной схемы датчика (генератор и триггер). Герметизация выполнена компаундом холодного отверждения. Интервал рабочих температур — от -30 до $+50^\circ\text{C}$.

Датчик КВД выдает сигнал дискретной формы, когда через щель проходит металлическая пластина («флажок»), вызывающая срыв генерации и переключение триггера. Ширина щели равна 6 мм у датчика КВД-6М и 25 мм у датчика КВД-25.

Датчики КВП-8 и КВП-16 срабатывают при прохождении мимо них металлической пластины на максимальном расстоянии соответственно 8 и 16 мм. На рис. 45 по-

казаны датчики КВД-6М и КВД-25. Принципиальная электрическая схема генераторного датчика приведена на рис. 46.

Генератор колебаний собран на транзисторе $T1$. В цепи базы включен колебательный контур $L2-C1$. Катушка обратной связи $L1$ подключена между коллектором и источником питания. При отсутствии металлической пластины в щели между обмотками $L1$ и $L2$ датчика КВД схема генерирует колебания. Выходной транзистор $T3$ усилите-

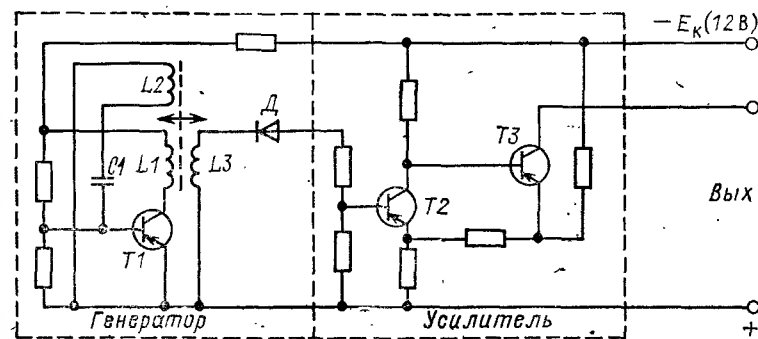


Рис. 46. Электрическая схема датчика КВД

ля при этом закрыт. При введении металлической пластины в щель датчика уменьшается коэффициент обратной связи, что вызывает срыв генерации. Выходной транзистор $T3$ открывается, и выходное реле или выходной логический элемент, включенный в цепи коллектора $T3$, срабатывает.

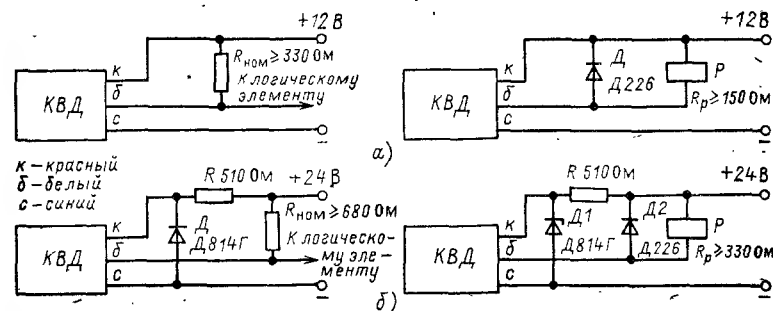


Рис. 47. Схемы подключения логических элементов и выходных реле к датчику КВД-6М:

а — при напряжении питания 12 В; б — при напряжении питания 24 В

Схемы подключения логических элементов и выходных реле к датчику КВД-6М показаны на рис. 47. Для защиты от перенапряжений, возникающих при резком уменьшении тока в цепи, катушку реле шунтируют диодом.

Следует отметить значительную зависимость точности датчиков от температуры окружающей среды и от колебаний напряжения питания. Так, например, при изменении температуры на 10°C погрешность датчика КВД-6М увеличивается на $\pm 0,3$ мм, КВД-25 — на $\pm 1,0$ мм, КВП-16 — на $\pm 2,5$ мм. Нормируемые колебания напряжения питающей сети приводят к отклонениям координаты срабатывания в пределах от $+0,5$ до $-0,75$ мм. При питании датчиков КВД и КВП от выпрямителей допустимый уровень пульсаций напряжения при работе с выходным реле составляет 10%, а при выходе на логический элемент 3%.

Подготовлены к производству генераторные датчики на интегральных микросхемах типов ПИЩ-6-1 (заменяющий КВД-6М) и ПИП-12-1 (плоскостный).

На станках и автоматических линиях нашли применение генераторные датчики положения серии БВК (БВК-24М, БВК201-24, БВК231-24 и др.). Они хорошо защищены эпоксидным компаундом от пыли, брызг масла и эмульсии. Вибрация пластины («флажка») на механизме может достигать 5 мм в направлении, перпендикулярном основанию корпуса переключателя. Ширина щели (рабочего зазора) составляет 6 или 10 мм. Температура окружающей среды может изменяться от -10 до $+45^\circ\text{C}$.

Выключатель серии БВК состоит из чувствительного и коммутирующего элементов, образующих полупроводниковый генератор. При отсутствии переключающей пластины в щели между ферритовыми сердечниками чувствительного элемента генератор не возбуждается. При введении пластины в рабочий зазор изменяется коэффициент обратной связи, возникает генерация и появляется выходное напряжение, достаточное для срабатывания выходного реле или логического элемента. Переключающая пластина может быть изготовлена из алюминия. Ширина пластины 15—30 мм, толщина 1—3 мм.

Средняя погрешность при изменении температуры окружающей среды и напряжения не превышает $\pm 1,5$ мм. Дифференциал срабатывания равен 1—3 мм. Напряжение питания 24 В постоянного тока. Выходное реле — МКУ-48 или КДР1 с катушкой 24 В, сопротивлением 280 Ом.

Подключение логических элементов серии «Логика-Т» к датчику БВК может быть выполнено как с потенциальным разделением (рис. 48, а — на элементе Т-201), так и без потенциального разделения с общим источником питания (рис. 48, б и в). Для уменьшения воздействия помех в схеме рис. 48, б установлен стабилитрон Д на напряжение не менее 12 В, а в схеме рис. 48, в применено смещение нуля выходного сигнала. При этом датчик БВК питается напряжением $+6$ и -12 В вместо обычных 0 и

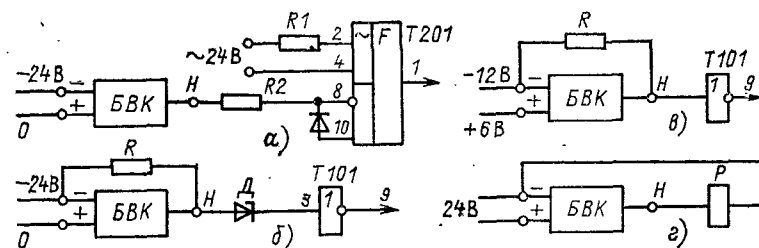


Рис. 48. Схемы подключения логических элементов и реле к генераторному датчику БВК

—24 В. Для уменьшения «дребезга» сигнала датчика рекомендуется устанавливать возле него конденсатор, шунтирующий цепь питания.

Схема включения датчика БВК с выходным реле Р показана на рис. 48, г.

По аналогичной схеме выполнен бесконтактный датчик положения типа БДП-2, имеющий цилиндрическую форму (габаритные размеры $65 \times 65 \times 75$ мм). Датчик срабатывает при движении вдоль торца цилиндра на расстоянии 25 мм металлической пластины размерами $50 \times 50 \times 3$ мм. Напряжение питания 24 В. Выходным аппаратом может служить электромагнитное реле с катушкой 24 В, сопротивлением не менее 160 Ом или логический элемент.

Магнитогерконовые датчики. Перспективными для применения в схемах автоматического позиционирования механизмов являются магнитогерконовые датчики. Для тяжелых условий окружающей среды созданы унифицированные магнитогерконовые датчики серии ДПУ (ДПУ1-40, ДПУ2-40, ДПУ1-100, ДПУ2-100). Датчики ДПУ1-40 и ДПУ1-100 имеют одноблочную конструкцию: в общем корпусе размещены магнитоуправляемый контакт (геркон) и постоянный магнит. Контакт датчика нормально разомкнут. При сближении датчика и управляющей ферромаг-

нитной пластины, установленной на механизме, магнитный поток встроенного постоянного магнита шунтируется и контакт замыкается. Посторонние ферромагнитные массы могут быть установлены вблизи датчика на расстоянии не менее 50 мм.

Датчики ДПУ2-40 и ДПУ2-100 состоят из двух частей: блока ДКП с магнитоуправляемым контактом и блока, содержащего постоянный магнит. Применяются два варианта установки этих блоков. В первом варианте блок ДКП установлен на неподвижной части, а блок с магнитом — на подвижной части контролируемого объекта. При подходе магнита контакт датчика замыкается. Во втором варианте оба блока монтируют вдоль пути механизма с зазором между ними. На механизме закрепляют управляющую ферромагнитную пластину размерами $150 \times 60 \times 2,5$ мм. При введении пластины в рабочий зазор напряженность магнитного поля в блоке с контактом снижается и контакт размыкается. Скорость движения механизма может достигать 10 м/с.

Рекомендуемые схемы подключения промежуточных реле к магнитоуправляемому контакту показаны на рис. 49. Для увеличения срока службы датчика катушку реле постоянного тока P шунтируют диодом D , который позволяет уменьшить электрическую дугу при размыкании цепи геркона G .

С этой же целью параллельно обмотке реле переменного тока включают искрогасительную RC -цепь. Сопротивление резистора 50—100 Ом, емкость конденсатора 0,5—1,0 мкФ. Максимальный рабочий зазор между датчиком и шунтом равен 40 мм для датчиков ДПУ1-40 и ДПУ2-40 и 100 мм для датчиков ДПУ1-100 и ДПУ2-100. Погрешность датчиков серии ДПУ равна ± 1 мм; дифференциал срабатывания равен 20—30 мм у ДПУ2-40 и ДПУ2-100, 50 мм у ДПУ1-40 и 100 мм у ДПУ1-100. Количество срабатываний в зависимости от мощности коммутируемой цепи составляет 10^6 — 10^7 циклов. Контакт датчика может работать в цепях напряжением до 220 В. Максимальная коммутируемая нагрузка в цепи 110 В равна 0,25 А, в цепи 220 В — 0,03 А, в цепи 30 В — 1 А.

Допустимые пределы изменения температуры окружающей среды составляют -50 °С и $+45$ °С; относительная влажность среды при $+25$ °С может достигать 98%. Испытания показали, что датчики серии ДПУ надежно работают при наличии ферромагнитной пыли, вблизи значительных ферромагнитных масс, при вибрации, колебаниях зазора между датчиком и контролируемым объектом. Аппараты легко монтируются и демонтируются, просты в эксплуатации.

Для автоматизации лифтов, подъемников и аналогичных механизмов применяют магнитогерконовые путевые датчики типа ДПЭ-101ПВ (рис. 50,а) пылеводозащищенного исполнения, которые могут работать при температуре окружающей среды от -50 до $+50$ °С и влажности до

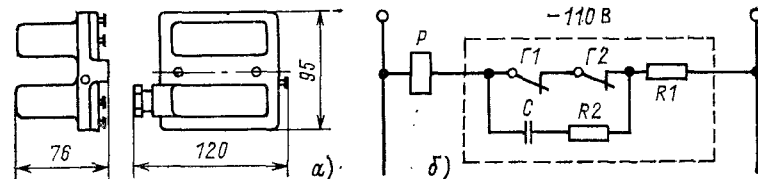


Рис. 50. Магнитогерконовый датчик ДПЭ-101ПВ и схема его включения с выходным реле:

Г1, Г2 — герконы; P — выходное реле; R1 — добавочный резистор; C, R2 — конденсатор и резистор искрогасительной цепи

98%. Число включений в час — до 6000. Коммутационный элемент датчика содержит два магнитоуправляемых герметизированных контакта. Они отделены воздушным зазором от возбуждающего постоянного магнита. При введении в зазор ферромагнитного шунта контакты замыкаются. К выходной цепи подключается реле или логический элемент. Точность срабатывания датчика ДПЭ-101ПВ — не ниже $\pm 3,0$ мм при отклонении управляющего шунта от оси симметрии рабочего зазора (щели) на ± 5 мм. Ширина щели 30 мм. Ширина шунта — не менее 70 мм, толщина 2—5 мм.

Максимальная длина шунта может быть определена по формуле, м,

$$L_{\text{ш}} = 0,1 + v(0,01 + t),$$

где v — скорость движения механизма, м/с; t — время срабатывания выходных устройств, с.

Датчик должен устанавливаться не ближе 30 мм от ферромагнитных масс и соседних датчиков.

Схема включения датчика ДПЭ-101ПВ с выходным реле показана на рис. 50,б. Напряжение питания 110 В по-

стоянного или переменного тока. Допустимая нагрузка соответственно равна 0,055 и 0,12 А. Искрогасительная RC-цепь служит для увеличения срока службы контактов. В момент размыкания контактов датчика конденсатор С заряжается, обеспечивая почти бездуговую коммутацию.

Для автоматизации станков разработаны малогабаритные магнитогерконовые датчики серии ВСГ (см. приложение 3).

Фотоэлектронные датчики и командоаппараты. В схемах управления движением механизмов и изделий широко используют фотореле. Наиболее совершенными являются унифицированные фотореле типов ФРСУ-1, ФРСУ-2, ФРСУ-3, ФРСУ-4 и ФРСУ-11. Головки фотореле имеют

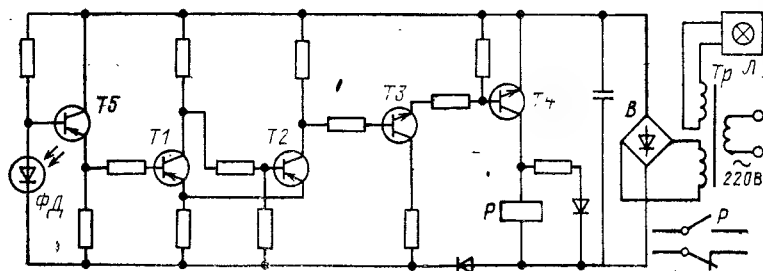


Рис. 51. Схема фотореле РФ8200

водяное охлаждение и могут работать при температуре окружающей среды до $+70^{\circ}\text{C}$. Все фотореле могут работать с осветителем за исключением ФРСУ-11, которое реагирует на излучение металла, нагретого до температуры выше 300°C . Фотоголовка может иметь углы зрения до $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ или $36' \times 3^{\circ} 26'$. В нее встроен не только фоторезистор или фотодиод, но и предварительный транзисторный усилитель. Фотореле серии ФРСУ имеют три выхода: бесконтактный с релейной характеристикой; бесконтактный для подключения реле РЭ-500, РЭВ-800 и т. п. или контактов КП-21 и МК-1; контактный (от встроенного реле РПУ-1).

Серийно выпускаемые фотореле не могут обеспечить высокую точность фиксации положения механизма, однако они применяются в схемах точной остановки, когда установка датчиков других типов невозможна.

Рассмотрим схему малогабаритного фотореле РФ8200 (рис. 51), предназначенного для общепромышленного применения. Фотореле состоит из трех узлов: блока питания, осветителя и светоприемника. В блоке питания рас-

положены трансформатор, выпрямитель с фильтром, усилитель мощности на транзисторе Т4 и выходное реле Р типа РПУ-0. Лампа осветителя Л подключается к отдельной обмотке трансформатора напряжением 6,3 В. В светоприемнике смонтированы объектив, фотодиод ФД и промежуточный усилитель на транзисторах Т5, Т1, Т2 и Т3. При освещении фотодиода его сопротивление уменьшается, на базе транзистора Т5 появляется положительный потенциал и транзисторы Т5 и Т1 закрываются. При этом открываются транзисторы Т2, Т3 и Т4 и срабатывает выходное реле Р.

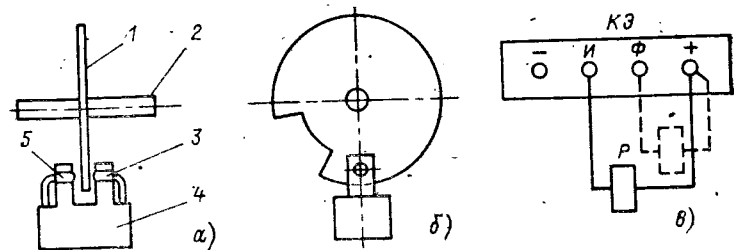


Рис. 52. Фотоэлектронный командоаппарат ВПФ11-01:

1 — диск; 2 — вал; 3 — светодиод; 4 — коммутационный элемент; 5 — фотодиод

Промышленностью освоено производство бесконтактных фотоэлектронных командоаппаратов типа ВПФ11-01; предназначенных для замены контактных кулачковых командоаппаратов серий КА4000 и КА400. Общий вид и схема чувствительного элемента командоаппарата показаны на рис. 52, а и б. Кулачковый вал командоаппарата соединяется с валом привода механизма. Вдоль оси аппарата расположены коммутационные элементы, в которых установлены оптоэлектронные пары (светодиод АЛ-107А и фотодиод ФД-25К, усилитель и формирователь импульсов. На валу закреплен ряд металлических дисков с прорезями; поворачивая диски, можно менять длину прозрачного участка. При засвечивании фотодиода появляется выходной сигнал «1» и загорается сигнальный светодиод. Напряжение сигнала «1» $24 \pm 4,8$ В, сигнала «0» 0—3 В. Осуществляется плавное регулирование длительности выходного сигнала в пределах 0—358°.

Число коммутируемых цепей 6, 12, 18 или 24; ток нагрузки — до 100 мА. На выходе могут быть включены

бесконтактный логический элемент или реле с катушкой 24 В постоянного тока, сопротивлением не менее 200 Ом (рис. 52,б). При подключении катушки реле к зажимам И и «+» реле втягивается, когда фотодиод освещен. Если реле подключить к зажимам Ф и «+» (показано пунктиром на рис. 52,б), то при освещенном фотодиоде реле отключено и срабатывает в момент перекрытия кулачковым диском излучения светодиода. Для коммутации более мощных нагрузок (3—5 А) можно использовать тиристорный переключатель типа ПТМ.

Максимальная частота вращения входного вала ВПФ11-01 равна 1000—1500 об/мин, что значительно выше, чем у контактных командоаппаратов КА4000, КА400. Передаточное число встроенного редуктора можно менять от 2 до 64.

Погрешность нового бесконтактного командоаппарата равна $\pm 0,5^\circ$, дифференциал срабатывания (в исполнении с редуктором) равен 2° . Он может работать при температуре окружающей среды от -40 до $+60^\circ\text{C}$.

В современных цифровых системах управления применяют дискретные датчики перемещения. Известны дискретные датчики перемещения различных типов. Наиболее целесообразно применение фотоэлектронных импульсных датчиков перемещения типов ПДФ-1, ПДФ-2, ПДФ-3. Эти датчики преобразуют значение угла поворота вала в число импульсов. Выходной сигнал представляет собой две серии импульсов; число импульсов на один оборот вала датчика ПДФ-1 равно 150, датчика ПДФ-2 — 300—6000, датчика ПДФ-3—600. Импульсы второй серии сдвинуты на 90° относительно первой для автоматического определения направления движения механизма.

Принцип работы датчика основан на модуляции светового потока, направленного от источника излучения (светодиода) через диск с прорезями на фотоприемник (фотодиод). В момент прохождения светового потока через прозрачный участок диска с выхода датчика снимается сигнал «1».

Для контроля положения механизмов используют также цифровые позиционно-кодовые преобразователи (так называемые преобразователи «вал—цифра» или «вал—код»). Разработаны кодовые датчики типов ПКФ12-1 и ПКФ12-1Н. Тип выходного кода — циклический двоичный, число разрядов 12. Датчик ПКФ12-1Н имеет устройство для дистанционной установки нуля с встроенным в датчик двигателем.

7. ВЫБОР МЕСТ УСТАНОВКИ ДАТЧИКОВ, ФОРМЫ И ДЛИНЫ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Расчет мест установки датчиков. На рис. 53, а показан характерный пример установки двух датчиков положения — конечных выключателей для получения точной остановки поступательно перемещающегося механизма I: выключателя предварительного замедления КВП и выключателя точной остановки КВТ. В момент переключения пластиной 2 конечного выключателя КВП начинается снижение частоты вращения двигателя от рабочей n_p до пониженной n_n (рис. 53,б).

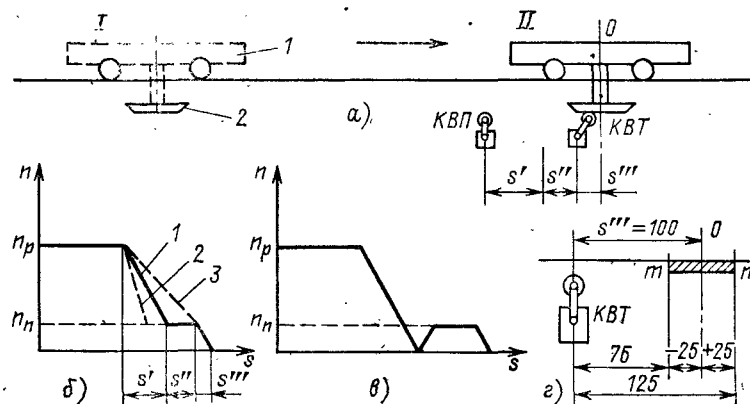


Рис. 53. К расчету мест установки датчиков положения

На рис. 53,а и б отмечен отрезок s' . Этот путь механизм проходит за время снижения частоты вращения до n_n . К конечному выключателю точной остановки КВТ механизм должен подойти с установившейся пониженной скоростью. Так как путь s' не является постоянным, необходимо иметь некоторый участок пути, на котором механизм работает на пониженной скорости. Этот отрезок обозначен s'' . И, наконец, от момента воздействия на конечный выключатель КВТ до точной остановки в положении 0 механизм проходит путь s''' .

Время работы двигателя на участке замедления и на установившейся пониженной частоте вращения и соответственно значения путей s' и s'' должны быть по возможности небольшими, чтобы не снижать производительность механизма. Для уменьшения пути на участке предварительного замедления s' обычно используется электрическое торможение.

Иногда бывает сложно автоматически осуществить график торможения по рис. 53,б с непосредственным переходом от рабочей к пониженной частоте вращения. В этих случаях используют график торможения, показанный на рис. 53,в. Производится полное затормаживание электропривода от рабочей частоты вращения n_p до нуля с последующим включением двигателя на пониженную частоту вращения n_n .

Для правильного выбора мест установки датчиков положения необходимо предварительно выполнить несложные вычисления пути торможения и неточности остановки (см. пример 5)¹.

Датчик точной остановки, например конечный выключатель КВТ, должен быть установлен перед заданным положением 0 на расстоянии, равном расчетному среднему пути торможения s''' . На рис. 53,г показана установка КВТ для случая, когда $s''' = 100$ мм, а максимальная неточность остановки равна ± 25 мм. На рисунке отмечена зона $m-n$, в которой практически окажется точка остановки механизма.

Для повышения производительности механизма расстояние между КВП и КВТ нужно выбирать минимально возможным. Однако это расстояние должно быть достаточным для надежного замедления механизма до выбранной пониженной скорости. Дело в том, что снижение частоты вращения двигателя от n_p до n_n может идти не по расчетному графику (прямая 1), а быстрее или медленнее (рис. 53,б, пунктирные прямые 2 и 3). Из-за неточности пути торможения необходимо выбирать расстояние между конечными выключателями КВТ и КВП равным не менее $s' + \Delta s'$. Здесь $\Delta s'$ — ошибка в пути торможения s' . Обычно в расчетах принимают $\Delta s' = 0,5 s'$ и расстояние между КВТ и КВП берут равным $1,5-2s'$. Так, например, если путь торможения s' равен 300 мм, то расстояние между КВТ и КВП следует установить не менее 450 мм. Это обеспечивает надежный выход механизма на пониженную скорость и, следовательно, относительно постоянное значение начальной скорости заключительного этапа торможения. Пример расчета мест установки датчиков приведен ниже.

Выбор формы и длины переключающих элементов. Переключающие элементы, воздействующие на приводные рычаги и толкатели конечных выключателей, следует

выполнять в виде пластин со скошенными концами (рис. 54,а). Такую пластину иногда называют «линейкой». Чем меньше углы скоса α и β , тем более плавно работает конечный выключатель, тем меньше он изнашивается.

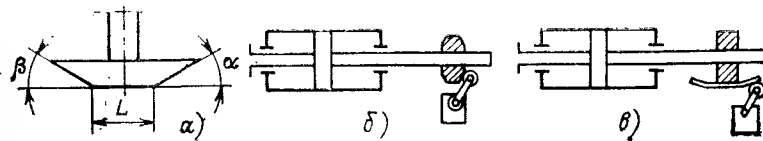


Рис. 54. Выбор формы переключающего элемента:

а — «линейка»; б — пример неправильной и в — правильной формы переключающего упора

Пример неправильной формы упора, выполненного в виде кольца, не имеющего скоса, приведен на рис. 54,б. Такой упор, часто используемый, например, на пневматических механизмах, не обеспечивает плавного нажатия на рычаг конечного выключателя, а при обратном ходе не дает безударного возврата рычага в исходное положение.

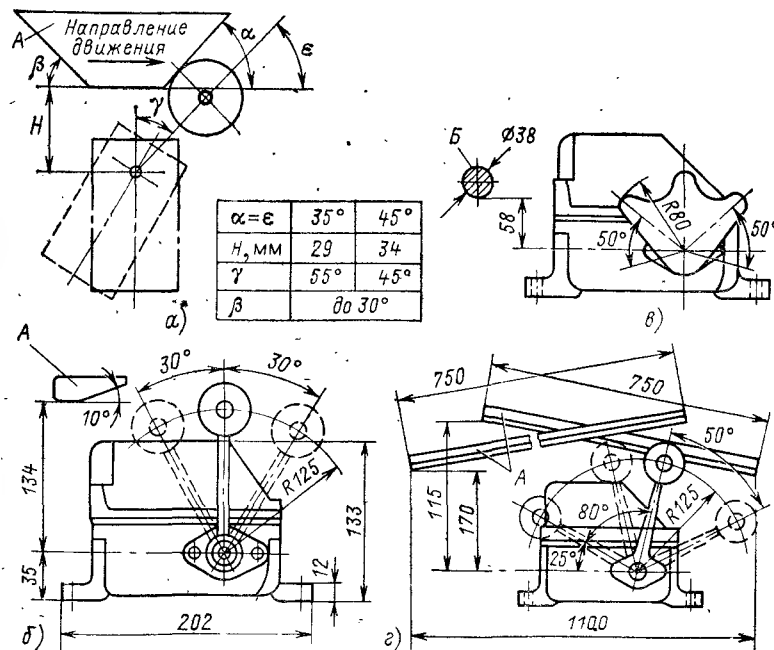


Рис. 55. Расположение переключающих пластин и упоров по отношению к конечным выключателям:

а — ВК-200Г, ВК-300Г; б — КУ-701А; в — КУ-704А; г — КУ-706А; А — линейка; Б — упор

7-3339

¹ Формулы расчета пути механизма при разных способах торможения см. приложение 1.

ние. Срок службы выключателя в этом случае резко сокращается.

На рис. 55 поясняется, как должны располагаться переключающие элементы по отношению к конечным выключателям ВК-200Г, ВК-300Г, КУ-701А, КУ-704А и КУ-706А.

Для расчета длины переключающей пластины необходимо знать значения среднего пути торможения $s_{т,ср}$ и максимальной неточности остановки $\Delta s_{т,макс}$. Когда ход механизма ограничивается конечным выключателем, пластина обычно должна иметь запас по длине, чтобы исключить возможность освобождения рычага конечного выключателя, так как это может повлечь за собой аварию при ошибочном повторном включении электропривода и поломку конечного выключателя одностороннего действия при обратном ходе механизма. Минимальная необходимая длина переключающей пластины равна сумме среднего пути торможения и максимальной неточности остановки.

В приближенных расчетах обычно принимают длину пластины равной $L \geq 1,5s_{т,ср}$.

При торможении в одну ступень без предварительного замедления длина пластины может получиться значительной (1 м и более). В этих случаях можно взамен конечных выключателей с самовозвратом рычага в исходное положение КУ-701А, ВК-300Г (исполнение 1) и др. использовать конечные выключатели типа КУ-704А или ВК-300Г (исполнение 2) с двумя роликами, без пружин самовозврата. Такие выключатели переключаются с помощью короткого упора; после прекращения воздействия упора состояние контактов выключателя не изменяется. В исходное положение контакты возвращаются при обратном ходе механизма.

Пример 5. Определить места установки конечных выключателей и длину пластины (линейки) для тележки, рассмотренной в примере 1 (рис. 4), при замене командоаппарата 8 конечными выключателями ВК-300Г.

Рабочая частота вращения двигателя $n_p = 940$ об/мин ($v_p = 0,6$ м/с).

Пониженная частота вращения $n_n = 190$ об/мин ($v_n = 0,12$ м/с).

Время срабатывания аппаратуры $t_a = 0,2$ с.

Для торможения используется механический тормоз.

1. Путь, проходимый тележкой за время срабатывания аппаратуры, $s_{a1} = v_p t_a = 0,6 \cdot 0,2 = 0,12$ м = 120 мм.

2. Время замедления от n_p до n_n

$$t_{r1} = \frac{J_{ср}(n_p - n_n)}{9,55 M_{дин,ср}} = \frac{0,623(940 - 190)}{9,55 \cdot 62,8} = 0,78 \text{ с.}$$

3. Путь тележки за время замедления от n_p до n_n

$$s_{r1} = \frac{v_p + v_n}{2} t_{r1} = \frac{0,6 + 0,12}{2} \cdot 0,78 = 0,28 \text{ м} = 280 \text{ мм.}$$

4. Суммарный путь торможения до n_n

$$s'_{т} = s_{r1} + s_{a1} = 280 + 120 = 400 \text{ мм.}$$

5. Путь, проходимый тележкой после срабатывания выключателя КВТ за время работы аппаратуры,

$$s_{a2} = v_n t_a = 0,12 \cdot 0,2 = 0,024 \text{ м} = 24 \text{ мм.}$$

6. Время и путь торможения с пониженной частоты вращения до полной остановки

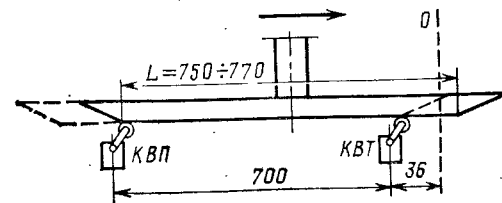
$$t_{r2} = \frac{J_{ср} n_n}{9,55 M_{дин,ср}} = \frac{0,623 \cdot 190}{9,55 \cdot 62,8} \approx 0,2 \text{ с;}$$

$$s_{r2} = \frac{v_n t_{r2}}{2} = \frac{0,12 \cdot 0,2}{2} = 0,012 \text{ м} = 12 \text{ мм.}$$

7. Суммарный путь торможения с n_n до полной остановки

$$s''_{т} = s_{r2} + s_{a2} = 12 + 24 = 36 \text{ мм.}$$

Рис. 56. К примеру расчета длины линейки



Конечный выключатель КВТ установим на расстоянии $s''_{т} = 36$ мм от положения остановки (рис. 56). Конечный выключатель КВП должен быть установлен перед КВТ на расстоянии не менее $1,5s'_{т} = 600$ мм. Примем это расстояние равным 700 мм. Длина переключающей пластины (рис. 56) должна быть не менее 750—770 мм, чтобы в момент остановки тележки оба конечных выключателя остались нажатыми.

Минимальные размеры переключающих пластин для бесконтактных датчиков положения механизмов приведены в приложении 3. Их длина определяется так же, как длина переключающих пластин конечных выключателей.

8. ПРИМЕРЫ СХЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ТОРМОЖЕНИЯ И ТОЧНОЙ ОСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Управление торможением. Схема конденсаторно-динамического торможения электропривода шпинделя алмазно-расточного станка модели ОС-1279А показана на рис 57. Мощность электропривода 2,2 кВт. Для безрисочного вывода резца из обрабатываемой детали привод шпинделя должен обеспечивать остановку резца в определенном положении. Поскольку приведенный к валу двигателя момент инерции шпинделя примерно в 15 раз превышает момент инерции ротора, любой вид одноступенчатого торможения не обеспечивает необходимой точности остановки резца. Применение КДТ позволяет решить эту задачу.

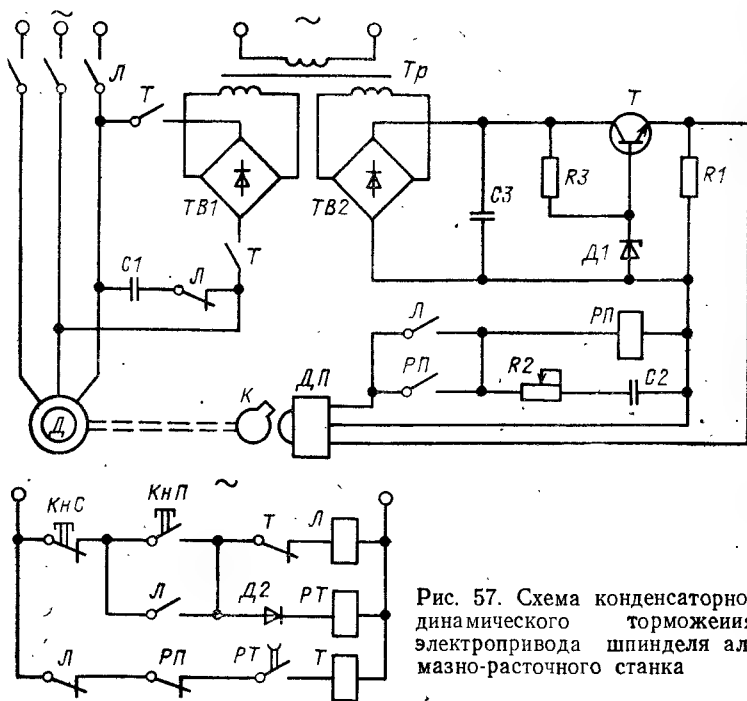


Рис. 57. Схема конденсаторно-динамического торможения электропривода шпинделя алмазно-расточного станка

Для контроля как частоты вращения шпинделя, так и положения резца применен датчик ДП типа БВК-24, в щель которого периодически входит сектор К, закрепленный на валу шпинделя. Датчик питается стабилизированным напряжением. К выходу датчика подключено реле РП, обмотка которого зашунтирована конденсатором С2. Когда сектор входит в щель ДП, включается реле РП и заря-

жается конденсатор С2. После срабатывания ДП реле РП удерживается током разряда этого конденсатора. При большой частоте вращения привода и, следовательно, высокой частоте импульсов от ДП реле РП остается включенным. При снижении частоты вращения, когда пауза между импульсами становится больше времени спада тока до значения, меньшего тока удержания, реле РП отпадает и подает команду на начало торможения.

Порядок работы схемы следующий. При нажатии кнопки КНП контактор Л подключает двигатель шпинделя к сети и включает реле РП, которое самоблокируется и подготавливает цепь контактора

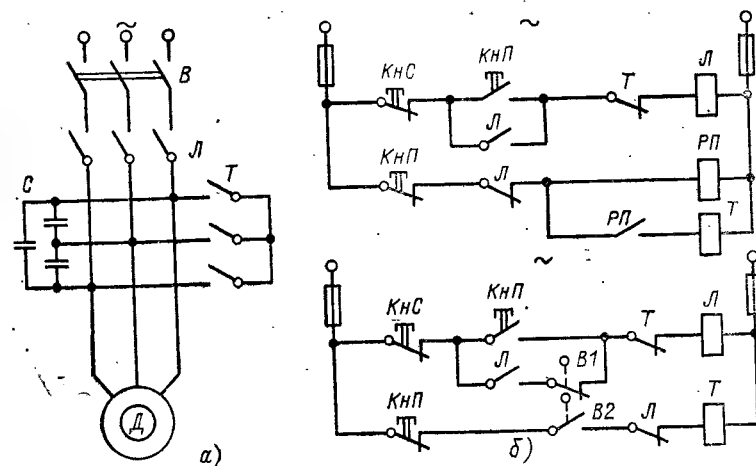


Рис. 58. Схемы управления конденсаторно-магнитным торможением

торможения Т. При нажатии кнопки КНС контактор Л отключает двигатель от сети и своим вспомогательным контактом подключает конденсатор С1 для осуществления первой ступени торможения. После снижения частоты вращения до заданного значения при очередном выходе сектора К из щели датчика ДП отпадает реле РП, срабатывает контактор Т, осуществляющий режим динамического торможения. Реле времени РТ отключает контактор Т после остановки двигателя при определенном положении резца.

Для уменьшения размеров конденсаторной батареи применено однофазное подключение конденсатора С1. Возникающие при этом пульсации тормозного момента двойной частоты не отражаются на работе механизма, так как вызываемые ими динамические силы поглощаются клиноремной передачей [4].

На рис. 58 показаны применяемые для малоинерционных электроприводов простые и эффективные схемы конденсаторно-магнитного торможения (КМТ). Основные узлы схемы нитексивного КМТ привода

резьбошлифовального станка даны на рис. 58,а. После нажатия кнопки *Кнс* двигатель переводится в режим динамического торможения, вслед за которым после срабатывания промежуточного реле *РП* и контактора *Т* обмотка статора замыкается накоротко. Включение контактов контактора *Т* по схеме звезды дает возможность снизить токовую нагрузку.

Для плавного торможения с последующей точной остановкой управление контакторами *Л* и *Т* производят с помощью путевых датчиков *В1* и *В2* (рис. 58,б).

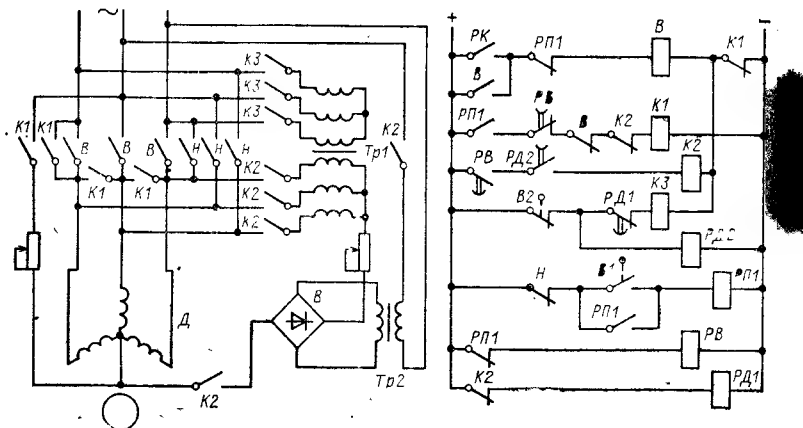


Рис. 59. Схема управления замедлением и остановкой электропривода с двумя пониженными частотами вращения

Управление замедлением с переходом на пониженные частоты вращения. Одна из эффективных схем комбинированного торможения с последовательным переходом на две устойчивые пониженные частоты вращения показана на рис. 59. Команду на начало цикла дает реле *РК*. На первом этапе позиционирования по команде датчика *В1* отключается контактор *В* и включается *К1*, благодаря чему к параллельно соединенным обмоткам статора двигателя *Д* подводится однофазное напряжение. При этом вращающий момент создается третьей пространственной гармоникой поля; он достигает значения $0,5M_{ном}$. Двигатель замедляется до частоты вращения $n_{ном}/3$ в режиме рекуперативного торможения. Затем подается вторая команда (реле *РВ*), отключается контактор *К1* и включается *К2*. В обмотки статора подается постоянный ток, скорость снижается благодаря динамическому торможению; затем по команде реле *РД1* срабатывает *К3*, в статор дополнительно подается переменный ток (через трансформатор *Тр1*) и двигатель в режиме двухтокового торможения переходит на «ползучую» частоту вращения.

На третьем этапе по команде датчика точной остановки *В2* контактор *К3* отключается и двигатель останавливается при динамическом торможении, в конце которого реле *РД2* отключает контактор *К2*. Катушка контактора реверса *Н* на схеме условно не показана.

Автоматическая точная остановка при циклическом движении механизма. Наиболее употребительные узлы схем автоматического управления возвратно-поступательным и шаговым движением механизма, применяемые в сочетании с рассмотренными схемами замедления и точной остановки электроприводов, даны на рис. 60.

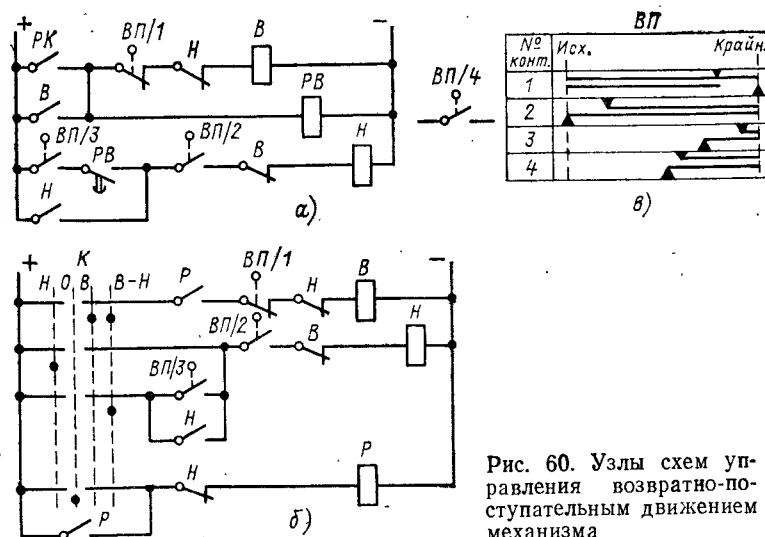


Рис. 60. Узлы схем управления возвратно-поступательным движением механизма

В схеме рис. 60,а с контролем положений механизма командоаппаратом после кратковременного замыкания контакта командного реле *РК* включается контактор *В* и механизм начинает движение. Перед подходом к заданной позиции контактом *ВП/4* командоаппарата дается команда на снижение скорости. Диаграмма замыкания контактов командоаппарата приведена на рис. 60,б. В конце хода контактор *В* отключается контактом *ВП/1* командоаппарата и электропривод останавливается. После отсчета времени паузы (реле *РВ*) срабатывает контактор *Н* и механизм возвращается в исходное положение, ограничиваемое контактом *ВП/2* командоаппарата.

Схема с подачей команды на начало цикла оператором и реверсом без выдержки времени показана на рис. 60,б. Цикл движения вперед — назад совершается после перевода рукоятки командоконтроллера *К* из нулевого положения в положение *В-Н*. Реверс включается контактом *ВП/3* командоаппарата. Перед началом очередного цикла рукоятку *К* необходимо вернуть в нулевое положение, фиксированное контактом *ВП/4*.

сируемое реле P . Как и в предыдущей схеме, при необходимости перехода на пониженную скорость перед точной остановкой или при комбинированном торможении (КДТ, КМТ и др.) используют контакт ВП/4 командоаппарата.

Для автоматического управления нереверсивным шаговым движением применяют схемы рис. 61. В схеме рис. 61,а по команде реле $РК$ втягивается и самоблокируется промежуточное реле P . Срабатывает линейный контактор $Л$. Механизм начинает движение. В середине хода размыкается контакт ВП/2 командоаппарата и реле P отключается, подготавливая отключение контактора $Л$ контактом ВП/1. Ес-

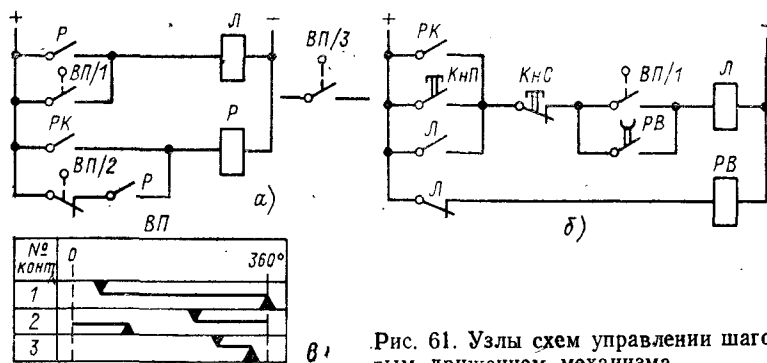


Рис. 61. Узлы схем управления шаговым движением механизма

ли применяется комбинированное торможение или переход на пониженную скорость, используют контакт ВП/3 командоаппарата. В конце шага механизма размыкается контакт ВП/1 и электропривод отключается, останавливаясь с заданной точностью. После очередного срабатывания реле $РК$ механизм совершает новый цикл перемещения. Барабан командоаппарата должен поворачиваться за один шаг механизма на 360 или 180°.

Вариант схемы с использованием одного контакта командоаппарата (или конечного выключателя) и реле времени для управления шаговым движением приведен на рис. 61,б.

Прецизионные системы автоматического позиционирования. Высокоточные позиционные электроприводы все чаще используют в различных отраслях промышленности. Основу их структуры составляют замкнутые по пути системы регулирования положения. Находят применение электроприводы как постоянного, так и переменного тока.

Характерным примером прецизионных систем постоянного тока может служить автоматизированный электропривод нажимных винтов современного листового прокатного стана, который осуществляет установку валков с точностью $\pm 0,01$ мм при длине хода 24 мм, т. е. $\pm 0,04\%$. Такую точность могут обеспечить только цифровые и цифро-аналоговые системы автоматического управления. Последние являются более простыми, чем полностью цифровые.

В цифро-аналоговой системе управления позиционным электроприводом (рис. 62) задание положения, измерение фактической координаты механизма и выделение сигнала ошибки (рассогласования) производят в цифровой форме. Заданное положение механизма s_z устройством ввода $УВЗ$ подается в параллельном двоичном коде на первый вход сумматора арифметического устройства $АУ$. На второй вход поступает число s , соответствующее действительному положению механизма. Для измерения служит многоразрядный датчик положения $ДП$, связанный с валом привода механизма. Этот датчик вырабатывает число s_d в параллельном потенциальном коде, которое преобразователем кода $ПК$ преобразуется в число s , отображающее координату механизма в двоичном коде.

Код рассогласования $N_{\Delta s}$, вычисленный сумматором $АУ$, поступает на цифро-аналоговый преобразователь код — напряжение $ПКН$. Сигнал напряжения рассогласования $U_{\Delta s}$ подается на вход регулятора положения $РП$ трехконтурной аналоговой части системы позиционного электропривода. Регулятор положения осуществляет линейное или нелинейное преобразование сигнала рассогласования. Линейная зависимость выходного сигнала $U_{вых}$ $РП$ от входного сигнала $U_{вх}$ обеспечивает минимальное время отработки лишь наибольшего заданного перемещения механизма. Если необходимо выполнить за минимально возможное время любое перемещение, используют $РП$ с параболической характеристикой. Для получения параболической зависимости $U_{вых}$ от $U_{вх}$ в обратной связи регулятора положения включают функциональный преобразователь, выходное напряжение которого пропорционально квадрату входного сигнала. Выходной сигнал регулятора положения $РП$ через задатчик интенсивности $ЗИ$ подается на регулятор скорости $РС$. Сигнал обратной связи поступает от тахогенератора $ТГ$. Внутренний контур тока содержит регулятор $РТ$, связанный с датчиком тока якоря $ДТ$. Регулятор тока воздействует непосредственно на систему импульсно-фазового управления тиристорного преобразователя $ТП$, питающего приводной двигатель $Д$.

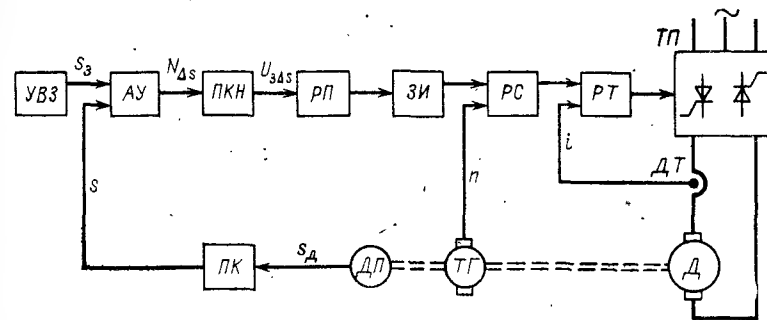


Рис. 62. Цифро-аналоговая система управления позиционным электроприводом

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Некоторые понятия и формулы.

Механической характеристикой называется кривая зависимости частоты вращения двигателя n от момента на его валу M (рис. П.1).

Под естественной механической характеристикой двигателя (рис. П.1, кривая 1) понимается характеристика двигателя при номинальном напряжении и частоте тока без добавочных резисторов в цепях статора и ротора (якоря) и при полном возбуждении (для двигателей постоянного тока). Характеристики двигателя, получаемые при изменении электрических параметров, называются искусственными (характеристика 2 при включении добавочных резисторов в цепь ротора).

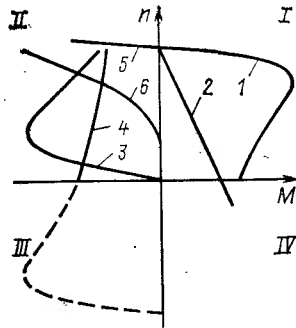


Рис. П.1. Механические характеристики асинхронного двигателя в двигательном и тормозных режимах:

1 — естественная; 2 — реостатная; 3 — характеристика динамического торможения; 4 — характеристика торможения противовключением; 5 — естественная характеристика в зоне рекуперативного торможения; 6 — характеристика конденсаторного торможения

Механическая характеристика двигателя проходит в I, II и IV квадрантах, а при изменении полярности включения или чередования фаз — в III, IV и II квадрантах.

Механические характеристики могут быть жесткими или мягкими. Характеристика является жесткой (1), если с ростом момента частота вращения меняется мало. Если же при небольших изменениях момента частота вращения сильно изменяется, то характеристика называется мягкой (2).

Статическим моментом M_c называется момент нагрузки на валу двигателя.

Динамическим моментом $M_{дин}$ называется результирующий момент на валу двигателя, т. е. алгебраическую сумму моментов двигателя, нагрузки и тормоза.

Для приведения момента нагрузки к валу двигателя необходимо разделить момент на передаточное число между валом двигателя и валом приложения момента.

Система единиц. В расчетах используется международная система единиц СИ. Масса тела измеряется в килограммах и численно равна весу тела (кгс) в ранее применявшейся технической системе единиц МКГСС. Единицей силы в системе СИ является 1 Н (ньютон), равный 1/9,81 кгс в системе МКГСС. Соответственно единицей момента вращения является 1 Н·м = 1/9,81 кгс·м.

Номинальный момент двигателя, Н·м,

$$M_{ном} = \frac{9550 P_{ном}}{n_{ном}}, \quad (П.1)$$

где $P_{ном}$ — номинальная мощность, кВт; $n_{ном}$ — номинальная частота вращения, об/мин.

Моменты инерции. Момент инерции J вращающихся частей привода равен, кг·м²,

$$J = mr^2, \quad (П.2)$$

где m — масса тела, кг; r — радиус инерции, м.

Для расчетов в международной системе единиц СИ необходимо перевести маховой момент ротора (якоря) двигателя GD^2_d , указанный в каталоге в системе МКГСС, в момент инерции J_d :

$$J_d = \frac{GD^2_d}{4}. \quad (П.3)$$

Приведенный к валу двигателя момент инерции массы m , поступательно движущейся со скоростью v , равен, кг·м²,

$$J' = \frac{91,2mv^2}{n^2}, \quad (П.4)$$

где m — кг; v — м/с; n — частота вращения двигателя, об/мин.

Момент инерции вращающегося тела для приведения к валу двигателя необходимо разделить на квадрат передаточного числа:

$$J' = J/i^2. \quad (П.5)$$

Формулы для расчета пути торможения. Механические характеристики асинхронного двигателя в режимах динамического торможения, торможения противовключением, генераторного (рекуперативного) и конденсаторного торможения приведены на рис. П.1.

а) Относительно постоянный тормозной момент (торможение противовключением, механическое торможение).

Время торможения, с,

$$t_T = \frac{J'(n_1 - n_2)}{9,55 M_{дин}}, \quad (П.6)$$

где J' — суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции всех движущихся частей, кг·м²; n_1 и n_2 — начальная и конечная частоты вращения, об/мин; $M_{дин}$ — приведенный к валу двигателя результирующий тормозной момент, Н·м.

Угловой путь торможения в оборотах вала двигателя

$$\varphi_T = \frac{n_1 + n_2}{120} t_T.$$

б) Тормозной момент изменяется по прямолинейному закону (рекуперативное торможение, конденсаторное торможение). Путь торможения от частоты вращения n_1 до n_2 (в оборотах двигателя)

$$\varphi_T = \frac{J'C}{573} \left[(CM_{дин1} + n_1) 2,31g \frac{M_{дин1}}{M_{дин2}} - (n_2 - n_1) \right], \quad (П.7)$$

где $C = \frac{n_2 - n_1}{M_{дин1} - M_{дин2}}$; $M_{дин1}$ и $M_{дин2}$ — динамические моменты при n_1 и n_2 .

Сводная таблица основных расчетных формул в системах единиц СИ и МКГСС

Величина	Формула в международной системе единиц СИ	Формула в технической системе единиц МКГСС	Примечание
Угловой путь торможения (в оборотах вала двигателя)	$\varphi_T = \frac{\delta i}{180} + \frac{n_1 t_a}{60} + \frac{J n_1^2}{1146 M_{дин}}$	$\varphi_T = \frac{\delta i}{180} + \frac{n_1 t_a}{60} + \frac{GD^2 n_1^2}{45 000 M_{дин}}$	
Максимальная неточность остановки (в оборотах вала двигателя)	$\Delta\varphi_{T,max} = \frac{\delta i}{360} + \frac{n_{1cp} t_a}{60} + \frac{J_{cp} n_{1cp}^2}{1146 M_{дин,cp}} \times \left(\frac{\Delta n_1}{n_{1cp}} + \frac{\Delta t_a}{t_{a,cp}} \right) + \frac{GD_{cp}^2 n_{1cp}^2}{45 000 M_{дин,cp}} \times \left(2 \frac{\Delta n_1}{n_{1cp}} + \frac{\Delta GD^2}{GD_{cp}^2} + \frac{\Delta M_{дин}}{M_{дин,cp}} \right)$	$\Delta\varphi_{T,max} = \frac{\delta i}{360} + \frac{n_{1cp} t_a}{60} + \frac{GD_{cp}^2 n_{1cp}^2}{45 000 M_{дин,cp}} \times \left(\frac{\Delta n_1}{n_{1cp}} + \frac{\Delta t_a}{t_{a,cp}} \right) + \frac{GD_{cp}^2 n_{1cp}^2}{45 000 M_{дин,cp}} \times \left(2 \frac{\Delta n_1}{n_{1cp}} + \frac{\Delta GD^2}{GD_{cp}^2} + \frac{\Delta M_{дин}}{M_{дин,cp}} \right)$	Для случая неизменного в процессе торможения суммарного тормозного момента; n_1 — начальная частота вращения двигателя.
Приближенная формула для расчета неточности остановки	$\Delta\varphi_{T,max} \approx \frac{J_{max} n_1^2}{2292 (M_T + M_{c,max})}$	$\Delta\varphi_{T,max} \approx \frac{GD_{max}^2 n_1^2}{9 \cdot 10^4 (M_T + M_{c,max})}$	
Номинальный момент двигателя	$M_{ном} = \frac{9550 P_{ном}}{n_{ном}}$	$M_{ном} = \frac{975 P_{ном}}{n_{ном}}$	
Суммарный момент инерции или маховой момент	$J = \frac{1,25 GD^2}{4} + \frac{91,2 m l^2}{n^2}$	$GD^2 = 1,25 GD^2_{л} + \frac{365 G \sigma^2}{n^2}$	

Продолжение табл.

Величина	Формула в международной системе единиц СИ	Формула в технической системе единиц МКГСС	Примечание
Время и путь торможения от частоты вращения n_1 до n_2 при постоянном тормозном моменте	$t_T = \frac{J(n_1 - n_2)}{9,55(M_T + M_c)};$ $\varphi_T = \frac{J(n_1^2 - n_2^2)}{1146(M_T + M_c)}$	$t_T = \frac{GD^2(n_1 - n_2)}{375(M_T + M_c)};$ $\varphi_T = \frac{GD^2(n_1^2 - n_2^2)}{45 000(M_T + M_c)}$	
Путь торможения от частоты вращения n_1 до n_2 при изменении тормозного момента по прямолинейному закону	$\varphi_T = \frac{JC}{573} \left[(CM_{дин1} + n_1) \times \right.$ $\times \left. 2,31 g \frac{M_{дин1}}{M_{дин2}} - (n_2 - n_1) \right]$	$\varphi_T = \frac{GD^2 C}{22 500} \left[(CM_{дин1} + n_1) \times \right.$ $\times \left. 2,31 g \frac{M_{дин1}}{M_{дин2}} - (n_2 - n_1) \right]$	$C = \frac{n_2 - n_1}{M_{дин1} - M_{дин2}}$
Время и путь динамического торможения до полной остановки	$t_1 \approx \frac{J n_1}{9,55(0,6 M_{ном} + M_c)};$ $\varphi_T \approx \frac{J n_1 t_T}{90} \left(1 - 0,11 \frac{M_c}{M_{ном}} \right)$	$t_1 \approx \frac{GD^2 n_1}{375(0,6 M_{ном} + M_c)};$ $\varphi_T \approx \frac{n_1 t_T}{90} \left(1 - 0,11 \frac{M_c}{M_{ном}} \right)$	Для двигателей серий МТКН, МТКР

Примечания: 1. Размерности величин, входящих в формулы расчетов в системе СИ: δ — град, n — об/мин, t — с, M — Н·м, J — кг·м², P — кВт, m — кг, v — м/с, GD^2 — кгс·м², Φ — обороты вала.

2. Размерности величин, входящих в формулы расчетов в системе МКГСС, те же за исключением: M — кгс·м, G — кгс.

Приложение 2. Технические данные конечных выключателей

Тип	Степень защиты	Наличие монтажного винта	Количество контактов		Рабочий ход рычага (толщина)	Усилие нажатия Н, вит	Номинальный ток А	Погрешность, мм	Размеры, мм	Масса, кг
			З	Р						
ВК-200Г	Пылеобразозащитное	Есть	1	1	12±2°	60	16	±0,2	60×73×136	1,2
ВК-300Г	Пылеводонепроницаемое	Есть	1	1	12±2°	60	16	±0,2	60×73×136	1,2
ВЛ-16	То же	Есть	1	1	10±3°	60	16	±0,2	58×76×135	0,95
КУ-701А	Брызгозащитное	Нет	Два в любой комбинации		24°	100	10	—	202×159×185	2,7
ВПК-1000	Пылеобразозащитное	Есть	1	1	15±5° (2,4 мм)	8	6	±0,2	От 63×48×102 до 63×48×136	0,12—0,32
ВПК-2000	Пылеводонепроницаемое	Нет	1	1	8,5 мм	23	6	± (0,1—0,3)	От 63×48×84 до 63×48×119	0,17—0,44
ВПК-4000	Пылеводонепроницаемое и др.	Нет	До четырех в любой комбинации		7 мм	20	10	±0,1	От 34×35×122 до 76×59×178	0,2—1,3
ВЛ-62	Пылеобразозащитное	Есть	1	1	8° (1,5—3,5) мм	2—15	10	±0,3	80×30×87	0,5
ВКМ-ВЗГ	Взрывозащитное	Есть	1	1	2 мм	40	2,5	0,5	115×74×135	0,52
ВВ	То же	Есть	2—4		10°	60	10	0,5	80×55×160	2

Приложение 3. Технические данные бесконтактных датчиков положения

Тип	Рабочий зазор, мм	Основная погрешность, мм	Дифференциал сигнала срабатывания, мм	Напряжение питания, В	Выходной сигнал, В, либо аппарат	Размеры, мм	
						датчика	переключающей пластины (минимальные)
КВД-6М, ПИЦ-6-1	6	±0,1	1,5	—12; 24	—12 В; —24 В; реле —12 В, 180 Ом или —24 В, 360 Ом	80×19×28	20×12×0,5
КВД-25	25	±0,2	4	—12; 24	—12 В; 24 В; реле —12 В, 150 Ом или —24 В, 330 Ом	105×48×70	40×35×1,0
КВП-8; КВП-16	8; 16	±0,2; 0,3	5	—12; 24	—12 В, —24 В; реле —12 В, 220 Ом или —24 В, 470 Ом	92×63×42	40×40×1; 60×60×1
БВК-24М; БВК-201-24; БВК-231-24	6; 10	±0,2	1—3	—24	—24 В; реле —24 В, 280 Ом	78×49×70	15×30×3
БДП-2	25	±0,5	Нет сведений	—24	—24 В; реле —24 В, 160 Ом	65×65×75	50×50×3
ИКВ-22	10	Нет сведений	Нет сведений	~24	реле ~12 В; 0,5 А	250×145×137	80×140×2
ИД-5	20	±1,0	Нет сведений	~220	—24 В; РЭВ-800	187×170×70	Нет сведений

Тип	Рабочий зазор, мм	Основная погрешность, мм	Дифференциал срабатывания, мм	Напряжение питания, В	Выходной сигнал, В, либо аппарат	Размеры, мм	
						датчика	переключающей пластины (миллиметры)
БСП-2; БРП	4	$\pm 0,5$	5	-24	-24 В, 160 Ом	94×40×46	80×15×3
ДПУ-40 ДПУ2-40	40	$\pm 1,0$	50 20	—	Магнитоуправляемый контакт (МК); $I_{откл} = 1$ А; ~ 220 В	190×100×70 80×100×34; 110×80×30	150×60×2,5
ДПУ1-100 ДПУ2-100	100		100 30	—		202×195×145 144×135×45; 140×80×30	150×60×2,5
ДПЗ-101ПВ	30	$\pm 3,0$	Нет сведений	—	МК; $I_{откл} = 0,12$ А (~ 110 В) или 0,055 А (~ 110 В)	80×125×76	40×80×2
ВСТ-1; ВСТ-2; ВСТ-3	4,5	$\pm 0,07$	8	—	МК; $I_{откл} = 1$ А (~ 220 В) или 0,2 А (~ 110 В)	70×38×31	57×30×2
ВКБ21-18	0,15	$\pm (0,06 \div 0,15)$	0,4	-12	-12 В	62×34×24	36×10×10
ВРБ12	0,12	$\pm 2,5 \cdot 10^{-3}$	0,6	-12	-12 В; РПУ-0; 160 мА	100×24×85	50×24×5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В. И. Выбор электродвигателей для производственных механизмов. — 3-е изд. — М.: Энергия, 1974. — 96 с.
2. Марголин Ш. М. Дифференциальный электропривод. — М.: Энергия, 1975. — 168 с.
3. Петров Л. П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. — М.: Энергоиздат, 1981. — 184 с.
4. Петров Л. П., Подзолов Р. Г., Буштыя Л. В. Автоматическое управление торможением станочных электроприводов. — М.: Машиностроение, 1978. — 135 с.
5. Сиротин А. А. Автоматическое управление электроприводами. — М.: Госэнергоиздат, 1959. — 532 с.
6. Зусман В. Г., Мейстель А. М., Херсонский Ю. И. Автоматизация позиционных электроприводов. — М.: Энергия, 1970. — 120 с.
7. Вешневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. — 6-е изд. — М.: Энергия, 1977. — 432 с.
8. Масандилов Л. Б., Москаленко В. В. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. — 2-е изд. — М.: Энергия, 1978. — 96 с.
9. Герасимьяк Р. П. Тиристорный электропривод для кранов. — М.: Энергия, 1978. — 112 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. Способы повышения точности остановки электропривода	5
2. Эффективные методы торможения асинхронных двигателей	16
3. Способы получения пониженной частоты вращения асинхронных двигателей	31
4. Точная остановка электроприводов постоянного тока	61
5. Командоаппараты и конечные выключатели. Погрешности срабатывания аппаратов	64
6. Бесконтактные датчики положения механизмов и командоаппараты	73
7. Выбор мест установки датчиков, формы и длины переключающих элементов	87
8. Примеры схем автоматического управления процессами торможения и точной остановки электроприводов	92
Приложения	98
Список литературы	3-я стр. обл.